



**İSKENDERUN TEKNİK**

**ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA  
TEZİ**

**HEGZAGONAL BOR  
NİTRÜR KATKILI KARBON/  
BAZALT HİBRİT  
KOMPOZİTLERİN  
KARAKTERİZASYONU VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Fatma BAKAL GÜMÜŞ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**OCAK 2021**



**HEGZAGONAL BOR NİTRÜR KATKILI KARBON/BAZALT HİBRİT  
KOMPOZİTLERİN KARAKTERİZASYONU VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**FATMA BAKAL GÜMÜŞ**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2021**

Fatma BAKAL GÜMÜŞ tarafından hazırlanan “HEGZAGONAL BOR NİTRÜR KATKILI KARBON/BAZALT HİBRİT KOMPOZİTLERİN KARAKTERİZASYONU VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Müh. Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Başkan:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Fatma BAKAL GÜMÜŞ

22/01/2021

# HEGZAGONAL BOR NİTRÜR KATKILI KARBON/BAZALT HİBRİT KOMPOZİTLERİN KARAKTERİZASYONU VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

FATMA BAKAL GÜMÜŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2021

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, elle yatırma ve vakum torbalama tekniği ile hegzagonal nano bor nitrür (h-nBN) katkılı karbon kumaş, bazalt kumaş ve hibrit (karbon kumaş+bazalt kumaş) takviyeli polimer matrisli kompozitlerin üretilmesi ve yapısal, termal ve mekanik olarak karakterize edilmesidir. Kompozit malzemelerin yapısına ağırlıkça %1; %2; %4 oranlarında h-nBN katılmıştır. Elde edilen malzemelerin mekanik özelliklerinin tayininde, ASTM D3039 standardına göre çekme, ASTM D7264 standardına göre üç noktalı eğilme, ASTM D256 standardına göre darbe deneyleri kullanılmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termal gravimetri (TGA) analizleri ile nano partikül ilavesinin kompozitlerin termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numunelerdeki organik bileşenleri belirlemek için FTIR analizleri yapılmıştır. Kompozitlerin yapısal ve mikroyapısal özellikleri, X-ışını difraktometrisi (XRD) kullanılarak kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi ve nano bor nitrürün dağılımları taramalı elektron mikroskobu (SEM)-EDS haritalama, çekme testinden sonra kırık yüzey morfolojileri ise stereo mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikrodalga emilim özellikleri, 3-18 GHz frekans aralığında Agilent marka 2 Portlu PNA-L network analizör cihazında iletim/yansıma ölçümleri ile araştırılmıştır.

Mekanik deneylerden elde edilen sonuçlara göre, kompozit malzemelere eklenen h-nBN partikülleri, belli oranlarda, kompozitin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını arttırmıştır. Hegzagonal nano bor nitrür katkılı malzemeler içerisinde en yüksek çekme ve eğilme dayanımları olan malzeme grupları, %1 h-nBN takviyeli, en yüksek darbe dayanımı olan malzemeler ise %4 h-nBN takviyeli kompozitlerdir. Çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan hasarlar gözlemlenerek hasar türü tespit edilmiştir. Bunlar katmanlar arasındaki zayıf ara yüzey yapışmasından kaynaklanan matris çatlaması, lif kırılması ve delaminasyondur. Ayrıca h-nBN takviyesinin polimer matrisli kompozit malzemelerin mikrodalga emilimi üzerinde de olumlu etkileri olduğu saptanmıştır. Çalışmalar sonucunda referans malzemeleri daha nitelikli bir kompozit ürüne dönüştürülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Hibrit kompozit malzemeler, hegzagonal nano bor nitrür, bazalt kumaş, karbon kumaş, mekanik özellikler, mikrodalga emilim

Sayfa Adedi : 96

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF THE MECHANICAL  
CHARACTERISTICS OF HEXAGONAL BORON NITRIDE DOPED CARBON / BASALT  
HYBRID COMPOSITES

(Ph. D. Thesis)

FATMA BAKAL GUMUS

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

JANUARY 2021

ABSTRACT

The aim of this study is the production of hexagonal nano boron nitride (h-nBN) doped carbon fabric, basalt fabric, and hybrid (carbon fabric+basalt fabric) reinforced polymer matrix composites by hand lay up and vacuum bagging technique and characterized structural, thermal and mechanical. The composites were reinforced by 1 wt.%; 2wt.%; 4 wt. ratios with h-nBN. Tensile tests according to the ASTM D3039 standard, three-point bending according to the ASTM D7264 standard and impact experiments according to the ASTM D256 standard were carried out to determine the mechanical properties of the composite samples. The effects of nanoparticle addition on the thermal properties of composites were investigated by differential scanning calorimetry (DSC) and thermal gravimetry (TGA) analyses. FTIR analyses were performed to determine the organic components in the samples. The structural and microstructural properties of composites have been extensively characterized using X-ray diffractometry (XRD). Surface morphology and dispersions of nano boron nitride were investigated using Scanning Electron Microscopy- EDS Mapping, the fracture morphologies were investigated after tensile test by means of stereo microscope. Microwave properties of samples were investigated through transmission/reflection measurements in Agilent brand 2-Port PNA-L Network Analyzer in the frequency range of 3-18 GHz.

According to mechanical test results, the addition of the h-nBN particles increased the tensile, bending and impact strengths of the composite in certain proportions. The highest tensile and bending strength were obtained at 1 wt.% h-nBN ratios and the highest impact results obtained at 4 wt.% h-nBN ratios. Types of the damage formation were determined by the observation of damages occurring after tensile testing. These are matrix cracking, fiber breakage, and delamination caused by poor interface adhesion between layers. In addition, it has been determined that h-nBN reinforcement has positive effects on microwave absorption properties of polymer matrix composite materials. As a result of the studies, the reference materials have been transformed into a more qualified composite product.

Key Words : Hybrid composite materials, hexagonal nano boron nitride, basalt fabric, carbon fabric, mechanical properties, microwave absorption

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

## TEŞEKKÜR

Sonsuz desteği, tavsiyesi ve sabrı için danışmanım Prof. Dr. Ahmet YAPICI'ya en derin şükranlarımı sunarım. Bilimsel ve kişisel deneyimlerinden yararlanma şansı elde ettiğim tez izleme komitesi üyeleri, çok değerli hocalarım Prof. Dr. M. Eyyuphan YAKINCI ve Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Öğr. Gör. Dr. Göksel SARAÇOĞLU, Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN ve Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL'e teşekkürlerimi sunarım. Bilimsel yönden her zaman ufkumu açan lisans ve lisansüstü eğitimlerimde desteğini her daim hissettiğim kıymetli hocam Doç. Dr. Mustafa EROL'a yardımları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Şekip DALGAÇ ve Hacı GÖDE'ye yardımları için teşekkür ederim.

Eğitim hayatımda, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, inanılmaz anlayışları ve teşvikleri için biricik annem Hamide BAKAL'a, kıymetli babam Ahmet Hamdi BAKAL'a, canım ablam Havva BAKAL ve canım kardeşlerim Ayşenur BAKAL ve Kübra BAKAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığıyla bu tez çalışması daha da kolaylaştı.

Bu tez çalışması, 219M018 nolu proje ile 1002-Hızlı Destek Programı-TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Son olarak bana her zaman inanan sevgili eşim Abdullah GÜMÜŞ'e teşekkür ederim. Onun sevgisi, desteği ve güveni olmadan bu tez yapılamazdı.

Bu tezi bana varlıklarıyla en büyük gücü veren kıymetli ailem ve sevgili eşime ithaf ediyorum.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgiler .....	1
1.2. Tezin Organizasyonu.....	3
2. TEORİK ALTYAPI .....	5
2.1. Kompozit Malzemeler.....	5
2.1.1. Sınıflandırılması.....	6
2.1.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler .....	8
2.1.3. Tabakalı kompozitler .....	14
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	18
3.1. Giriş.....	18
3.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar .....	18
3.3. Literatürde Oluşan Boşluklar.....	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	26
4.1. Amaç .....	26



	<b>Sayfa</b>
4.2. Malzemeler.....	26
4.3. h-nBN Nano Partikül Takviyeli Epoksinin Hazırlanması.....	28
4.4. Elle Yatırma+Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Plakaların Üretimi ....	28
4.5. Malzeme Karakterizasyonu.....	31
4.5.1. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC).....	31
4.5.2. Termogravimetrik analiz (TGA).....	32
4.5.3. Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometre (FTIR) analizi .....	32
4.5.4. X-Işını difraktometresi (XRD) analizi .....	33
4.5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)- EDS haritalama analizi.....	33
4.6. Mekanik Testler.....	34
4.6.1. Tahribatsız muayeneler .....	34
4.6.2. Çekme testi.....	35
4.6.3. Üç noktalı eğilme testi .....	36
4.6.4. Izod darbe testi .....	37
4.7. Mikrodalga Emilim Ölçümleri .....	38
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	40
5.1. Malzeme Karakterizasyonu Sonuçları .....	40
5.1.1. DSC analizleri .....	40
5.1.2. TGA analizleri.....	42
5.1.3. FTIR analizleri .....	44
5.1.4. XRD analizleri .....	46
5.1.5. SEM- EDS haritalama analizleri .....	51
5.2. Mekanik Test Sonuçları .....	56
5.2.1. Tahribatsız muayeneler .....	56
5.2.2. Çekme testi.....	58
5.2.3. Üç noktalı eğilme testi .....	66

	<b>Sayfa</b>
5.2.4. Izod darbe testi .....	67
5.3. Mikrodalga Emilim Sonuçları .....	68
<b>6. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....</b>	<b>79</b>
6.1. Genel Değerlendirme .....	79
6.2. Öneriler.....	82
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>92</b>



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Termoset ve termoplastiklerin özellikleri .....	9
Çizelge 2.2. Liflerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .....	10
Çizelge 4.1. Üretilen malzeme grupları .....	29
Çizelge 4.2. Hibrit kompozitlerin tanımlanması.....	30
Çizelge 4.3. Kompozitlerin üretiminde kullanılan epoksi reçine ve elyafların yoğunluk değerleri .....	35
Çizelge 5.1. Katkı elemanın özellikleri .....	51
Çizelge 5.2. Bor nitrürün kimyasal bileşimi .....	51
Çizelge 5.3. Kompozitlerin ağırlık ölçüm sonuçları .....	57
Çizelge 5.4. Kompozitlerin kalınlık ölçüm sonuçları .....	57
Çizelge 5.5. Kompozitlerin teorik yoğunluk değerleri .....	58
Çizelge 5.6. Radar frekans bantları ve kullanım yerleri .....	70
Çizelge 5.7. Maksimum verimdeki numune türleri ve absorban değerleri .....	71

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Epoksi matrisli nanopartikül takviyeli kompozitlerin üretim prosesi.....	29
Şekil 5.1. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri .....	40
Şekil 5.2. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri .....	41
Şekil 5.3. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri .....	41
Şekil 5.4. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri .....	43
Şekil 5.5. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri .....	43
Şekil 5.6. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri .....	44
Şekil 5.7. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri .....	44
Şekil 5.8. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri .....	45
Şekil 5.9. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri.....	46
Şekil 5.10. Hegzagonal bor nitür tozunun XRD grafiği .....	47
Şekil 5.11. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri .....	48
Şekil 5.12. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri .....	49
Şekil 5.13. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri.....	50
Şekil 5.14. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin çekme mukavemeti diyagramları.....	58

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.15. 12 kat bazalt kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı kullanılarak hazırlanmış kompozitlerin $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramları.....	59
Şekil 5.16. 3 kat bazalt+6 kat karbon+3 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı .....	60
Şekil 5.17. 12 kat karbon kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı kullanılarak hazırlanmış kompozitlerin $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramları.....	61
Şekil 5.18. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin eğilme mukavemeti diyagramları.....	67
Şekil 5.19. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin darbe dayanımı diyagramları.....	68
Şekil 5.20. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı $S_{11}$ (Yansım) grafikleri.....	72
Şekil 5.21. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı $S_{11}$ (Yansım) grafikleri .....	73
Şekil 5.22. 3 kat karbon+6 kat bazalt +3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı $S_{11}$ (Yansım) grafikleri .....	74
Şekil 5.23. 3-18 GHz frekans aralığı arasında numunelerin $S_{12}$ (İletim) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar.....	76
Şekil 5.24. 3-18 GHz frekans aralığı arasında metal plakalı numunelerin $S_{11}$ (Yansım) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar .....	77

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. Airbus 380'de fiber takviyeli polimer kompozitlerin kullanımı .....	2
Resim 2.1. Venn diyagramını kullanarak malzemelerin sınıflandırılması.....	5
Resim 2.2. Parçacık takviyeli kompozitlerin türleri (a) büyük parçacıklı, (b) nano boyutlu .....	7
Resim 2.3. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) sürekli ve hizalanmış, (b) süreksiz ve hizalanmış, (c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş .....	8
Resim 2.4. Dokuma bazalt elyaf kumaş .....	11
Resim 2.5. Dokuma karbon elyaf kumaş .....	12
Resim 2.6. Hegzagonal bor nitrid yapısı .....	13
Resim 2.7. Sandviç kompozit yapımı .....	14
Resim 2.8. Laminer kompozitlerin şematik gösterimi .....	15
Resim 2.9. 1- giriş, 2-vakum torbası, 3- akış filesi, 4- soyma kumaşı, 5- takviye elemanı, 6- çıkış, 7- vakum contası, 8- kalıp .....	16
Resim 2.10. Elle yatırma yöntemi.....	16
Resim 4.1. (a) hegzagonal nano bor nitrid, (b) epoksi, (c) serleştirici .....	27
Resim 4.2. (a) karbon elyaf kumaş, (b) bazalt elyaf kumaş .....	27
Resim 4.3. (a) vakum torbası, (b) PeelPly, (c) infüzyon filesi, (d) vakum battaniyesi .....	28
Resim 4.4. Üretimden görüntüler .....	30
Resim 4.5. Farklı oranlarda katkılandırma yapılmış kompozit plakaların görüntüleri ..	31
Resim 4.6. DSC kullanım alanları .....	32
Resim 4.7. Bir SEM mikroskopunun çekirdek bileşenlerinin şematik diyagramı .....	33
Resim 4.8. Dijital kumpas ile kalınlık ölçümü .....	34
Resim 4.9. Çekme testinden görüntüler .....	35
Resim 4.10. Üç noktalı eğilme deneyinin uygulanması.....	37
Resim 4.11. Izod darbe testi numuneleri.....	38

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.12. Çentikli Izod test düzeneği.....	38
Resim 4.13. Vektörel network analizör cihazı.....	39
Resim 5.1. h-nBN'nin SEM görüntüsü.....	52
Resim 5.2. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı.....	53
Resim 5.3. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı.....	54
Resim 5.4. 3 kat karbon+6 kat bazalt +3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı .....	55
Resim 5.5. 12 kat bazalt kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı, 12 kat karbon kumaş (e) saf, (f) %1 h-nBN katkı, (g) %2 h-nBN katkı, (h) %4 h-nBN katkı, kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar bölgelerinin stereo mikroskop görüntüleri .....	63
Resim 5.6. 3 kat bazalt+6 kat karbon+3 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar bölgelerinin stereo mikroskop görüntüleri (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı.....	64
Resim 5.7. Epoksi matriste grafen/çatlak etkileşimin şematik gösterimi; (1) çatlak saplanması ve çatallaşma, (2) çatlak ucu körleme, (3) grafen kırılması, (4) çatlak sapması, (5) grafen tabaka kırılması, (6) çatlağın grafen tabakalarının arasına nüfuz etmesi (penetrasyon), (7) grafen tabakalarının ayrılması, (8) çatlağın grafen tabakalarının arasından geçmesi, (9) grafenin genişliği boyunca çatlak ilerlemesi, (10) grafenin kalınlığı boyunca çatlak ilerlemesi, (11) çatlak dallanması .....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>MPa</b>	Megapascal
<b>nm</b>	Nanometre
<b>dB</b>	Desibel
<b>mm</b>	Milimetre
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>°C</b>	Santigrat
<b>g</b>	Gram
<b>GHz</b>	Gigahertz

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials
<b>DSC</b>	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
<b>FTIR</b>	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre
<b>h-nBN</b>	Hegzagonal Nano Bor Nitrür
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TGA</b>	Termogravimetrik Analiz
<b>XRD</b>	X-Işını Difraktometresi



# 1. GİRİŞ

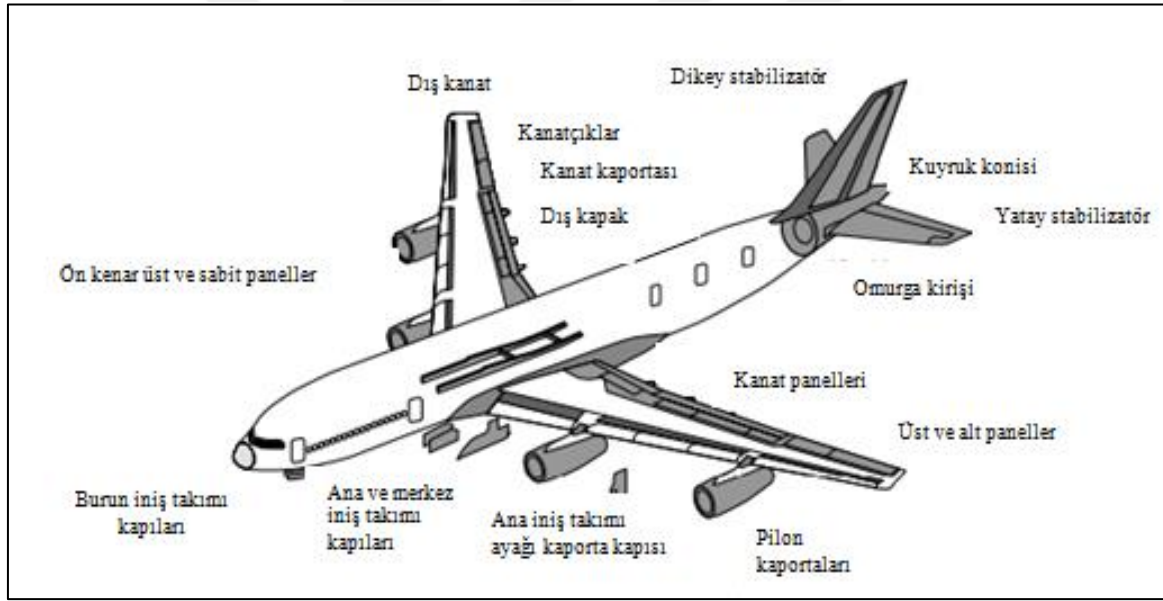
## 1.1. Genel Bilgiler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan heterojen malzemelerdir. Otomotiv, havacılık, savunma sanayii alanlarında yapılan birçok çalışma farklı bileşenlerden oluşan malzemelerin daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır (Baradeswaran, Vettivel, Perumal, Selvakumar ve Issac, 2014). Farklı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin, bir çok geleneksel metalik malzemeye kıyasla düşük yoğunluklarından dolayı mukavemet-ağırlık ve modül-ağırlık oranları belirgin bir şekilde daha üstündür. Bu sebeple daha iyi mukavemet ve modül değerlerine sahiptirler (Chung, 2019).

Ayrıca birçok kompozit malzeme mükemmel yorulma dayanımı ve yorulma hasarı toleransına sahiptir. Bu nedenle elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler havacılık, otomotiv ve diğer endüstrilerde kritik öneme sahip bileşenlerin üretiminde tercih edilmektedir. 1969 yılında F-14 savaş uçaklarının yatay stabilizatörlerinde bor fiber takviyeli epoksi yüzeylerin kullanılmasıyla, fiber takviyeli polimerlerin havacılık endüstrisinde kullanımında istikrarlı bir büyüme yaşanmıştır. Bu gibi bileşenlerin yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığın olumlu sonuçlar vermesiyle performanslarına güven duyulmuş bu da askeri uçaklarda artan miktarda kompozit kullanılmasıyla sonuçlanmıştır. Örneğin, 1982'de tanıtılan dikey ve kısa kalkış ve iniş (VSTOL) uçağı olan AV-8B'nin uçak gövdesi, ağırlıkça yaklaşık %25 oranında, aynı şekilde F-22 avcı uçağı da ağırlıkça ~%25 oranında karbon elyaf takviyeli epoksi içermektedir (Mallick, 2007: 24). Bazalt fiberleri ise karbon fiberlerine göre daha düşük Young modülüne sahiptirler buna karşın mukavemet değerleri karbon elyafa yakın değerdedir ve görece düşük üretim maliyetlerine sahiptirler.

Bu tez çalışması ile son zamanlarda havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelere alternatif olabilecek ve bu alanda ilk defa kullanılacak olan daha düşük maliyetli yeni bir kompozit malzemenin üretimi ve ürün geliştirme testleri yapılacaktır. Global bazda çevreye verilen önemin artmasıyla seçkin özellikleri ve doğal kaynaklardan üretiminin mümkün olması sebebiyle bazalt bazlı materyallere olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Öte yandan havacılık sektöründeki

periyodik muayeneler ve sonuçların değerlendirilmesi ile hasarların çoğunun yabancı cisimlerin çarpması ve şimşek çakmasından olduğu tespit edilmiştir (Mallick, 2007: 25). Uçak endüstrisinde kullanılan polimerik kompozitler elektriksel olarak yalıtıcıdır ve bu tür yapılar yıldırım çarpmalarına ve plazma kanalı alanındaki aşırı ısınma gibi etkilere karşı uygun malzemelerdir (Katunin ve diğerleri, 2017). Enerji absorblama yeteneği, düşük ve yüksek hızlı darbe direnci oldukça iyi olan bazalt bu alanda kullanılabilecek iyi bir alternatif olacaktır. Fiberle güçlendirilmiş kompozitlerde liflerin türü, oryantasyonu ve konsantrasyonu gibi parametrelerin değiştirilmesiyle istenilen özelliklerde farklılık elde edilebilir. Ayrıca mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için belirli oranlarda yapı içerisine hegzagonal nano bor nitrür katkısı yapılacaktır. Resim 1.1, 2006'da tanıtılan Airbus A380'deki kompozit kullanımını şematik olarak göstermektedir. Ağırılığının yaklaşık %25'i kompozit malzemeden oluşmaktadır (Mallick, 2007: 26).



Resim 1.1. Airbus 380'de fiber takviyeli polimer kompozitlerin kullanımı (Mallick, 2007: 27)

Kimyasal yapısı cam elyaflara benzer olan bazalt elyaflar, bazalt volkanik taşların yüksek sıcaklıkta ergitilmesiyle elde edilir. Çekme dayanımı, elastisite modülü, kimyasal kararlılığı yüksek olan, askeri savunma ve deniz donanmasında kullanım sahası olan bazalt elyafların ticari endüstriye entegre edilmesiyle endüstride kullanımı gün geçtikçe artmıştır (Demirci ve Avcı, 2017). Karbonlaşmış akrilik elyaflardan üretilen karbon kumaş ise korozyon direnci ve mukavemeti yüksek, yoğunluğu düşük bir malzemedir. Bor ise kaynaklarının büyük bir kısmı ülkemiz topraklarında bulunan bir elementtir. Bu nedenle,

bu iki olgunun bir araya getirilmesi sonucu elde edilecek olan bor katkılı hibrit kompozitlerin geniş bir spektrumdaki kullanım alanı (otomotiv, havacılık, uzay sanayii vb.) ile yüksek katma değer ortaya koyacağı düşünülmektedir.

Tezin konusu, dünya kaynaklarının %72,8'i (Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 2014) ülkemiz topraklarında bulunan bor ve bundan elde edilmiş bileşiklerin uygun üretim teknikleri kullanılarak hibrit kompozit malzemelerde katkı elemanı olarak kullanılması ve bazalt/karbon kumaş tabanlı polimer matrisli hibrit kompozitlerin üretilmesi ve bunun kritik uygulama alanları için (savunma sanayii, havacılık vb.) uygunluğunun belirlenmesidir. Bu tez çalışması, hegzagonal nano bor nitrürün katkı elemanı olarak kullanıldığı bazalt-karbon kumaş/epoksi hibrit kompozitlerin üretildiği ve mekanik, kimyasal, yapısal karakterizasyonunun yapıldığı ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.

## **1.2. Tezin Organizasyonu**

Bu tezin temel amacı, bor katkılı hibrit kompozitlerin elle yatırma+vakum torbalama tekniği kullanılarak üretilmesi, mekanik performans deneyleri ve özelliklerin iyileştirilmesi, kimyasal ve yapısal karakterizasyonu, radar emilim ölçümleri hakkında bilgi vermektir. Bu amaçla, ara sıcaklık ürünlerinin kimyasal yapısını ve reaksiyon tipini tanımlamak için kompozit plakaların üretiminde termogravimetri (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve Fourier dönüşümlü infrared (FTIR) cihazları kullanılmıştır. Kompozitlerin yapısal ve mikroyapısal özellikleri, X-ışını difraktometrisi (XRD) kullanılarak kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi ve nano bor nitrürün dağılımları taramalı elektron mikroskobu (SEM)-EDS Haritalama ile incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, eğme, darbe deneyleri yapılarak, nano bor nitrürün karbon ve bazalt kumaş kompozitlerin içerisindeki varlığı, dağılımı gibi etkenlerin çekme, eğme ve darbe dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Vektörel network analizör kullanılarak radar ölçümleri alınmıştır.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, kompozit malzemelere genel bir giriş yapılmıştır ve bu tezin amacı tanıtılmıştır. İkinci bölümde, kompozit malzemelerin sınıflandırılması, üretim yöntemleri ile ilgili kapsamlı bir teorik altyapı oluşturulmuştur. Üçüncü bölümde, literatür ayrıntılı olarak incelenmiş ve tezin tespit edilen açığa katkısı vurgulanmıştır. Deneysel çalışmalarını içeren dördüncü bölümde malzemeler, üretim

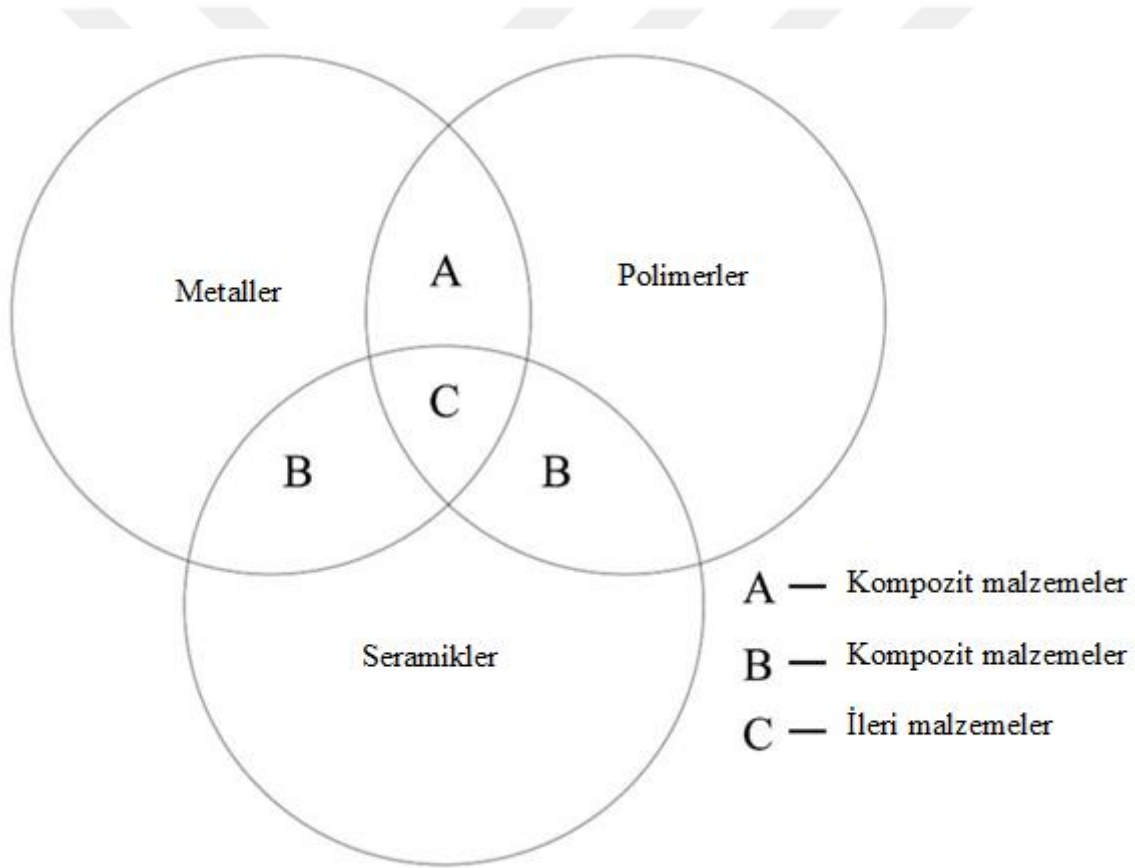
süreçleri ve kullanılan cihazlar sunulmuştur. Beşinci bölümde, yapılan deneylerle ilgili sonuçlar ayrıntılı olarak gösterilmekte ve tartışılmaktadır. Genel değerlendirme ve öneriler ise altıncı bölümde özetlenmiştir.



## 2. TEORİK ALTYAPI

### 2.1. Kompozit Malzemeler

Malzeme bilimi temelinde metaller, polimerler ve seramikler olmak üzere 3 farklı malzeme türü bulunmaktadır. Resim 2.1’de Venn diyagramı kullanılarak malzemelerin sınıflandırılması gösterilmiştir. Kompozitler veya kompozit malzemeler, fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde geniş tutarsızlıklara sahip iki veya daha fazla farklı tip malzemeden oluşan, daha üstün özellikler gösteren mühendislik malzemeleridir (Egbo, 2020). Matris malzemesi ve takviye malzemesinden oluşan çok fazlı bir sistemdir.



Resim 2.1. Venn diyagramını kullanarak malzemelerin sınıflandırılması (Egbo, 2020)

Teknolojik ilerlemenin geleceği, genel olarak, kompozit malzemelere bağlıdır (Chawla, 2012: 3-6). Bu malzemeler, diğer malzeme türlerine (metaller, alaşımlar, seramikler ve polimerler) göre üstün fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklere sahiptir.

### 2.1.1. Sınıflandırılması

İnsanoğlu tarafından üretilen ve kullanılan ilk kompozit, kamy ve çamurun duvar yapımı için yapı malzemesi olarak kullanıldığı 6000 yıl öncesine dayanmaktadır (Shaffer, 1993). Son yüzyılda, bu yapı malzemesi yerine farklı takviyelerden oluşan kompozitler almıştır. Modern kompozitlerin 1950'lerde, içeriğinde cam elyaf ve polyester barındıran fiberglas kullanımı ile ortaya çıktığı varsayılabilir (Erden ve Ho, 2017: 51-79). Kullanılan matris malzemesine göre, kompozit malzemeler üç ana gruba ayrılabilir: polimer matris kompozitleri, seramik matris kompozitleri ve metal matris kompozitleri. Takviye elemanına göre sınıflandırmalarda üç kategoriye ayrılabilir: tek tip eksenlere sahip inklüzyonları kullanan parçacık takviyeli kompozitler, fiber benzeri inklüzyonları kullanan fiber (elyaf) takviyeli kompozitler, kompozitler ve homojen malzemelerin bir kombinasyonu olan yapısal (tabakalı) kompozitler (Callister ve Rethwisch, 2007: 579, 580).

#### *Metal matris kompozitler*

Ana yapının metalden yapıldığı ve takviye elemanının seramik veya organik malzeme olduğu kompozitlerdir. Geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, güçlendirilmiş mekanik ve termal özellikler ve kolay şekillendirilebilme nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedirler (Güler ve Bağcı, 2020). Çelik, demir, alüminyum, çinko, karbon, bakır, nikel, gümüş, titanyum ve magnezyum matris malzemesi olarak kullanılabilir. Metal matris kompozit içeren tipik mühendislik yapıları arasında tank zırhı, otomotiv fren diskleri ve otomotiv motorları bulunur.

#### *Seramik matris kompozitler*

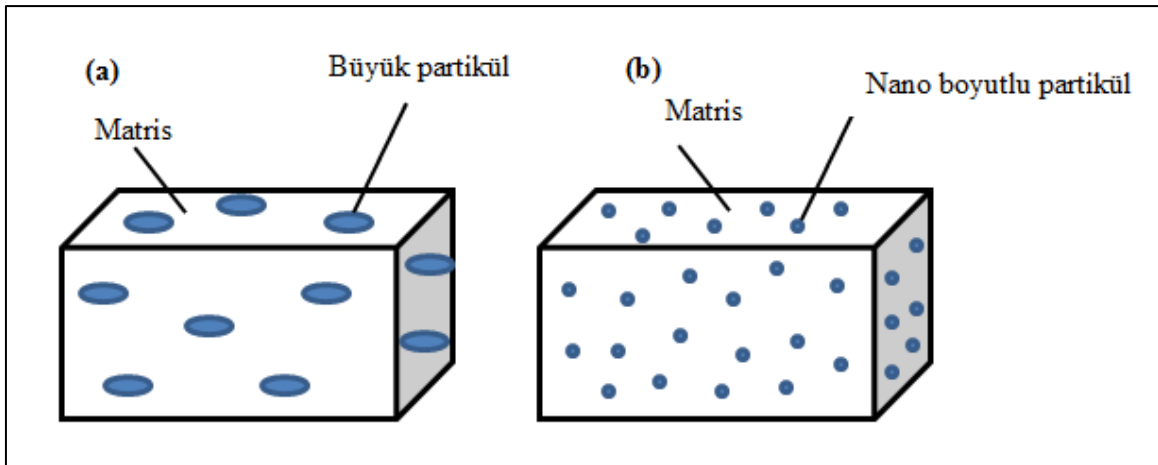
Tipik olarak karbon veya seramik elyaflarla takviye edilmiş bir seramik matristen oluşan heterojen malzemelerdir. Düşük yoğunluk, iyi mukavemet, iyi termal şok direnci, iyi oksidasyon direnci (çevresel bir kaplama bariyeri uygulanmışsa), iyi boyutsal stabilite ve özellikle yüksek sıcaklık ve agresif ortamlardaki stabilitesi gibi özellikler, seramik matrisli kompozitleri üst düzey uygulamalar için çok çekici kılmaktadır (Alves, Bapista ve Marques, 2016; Glass, 2008). Alümina, silisyum karbür, alüminyum nitür, silisyum nitür ve zirkonya yaygın bir şekilde seramik matris olarak kullanılmaktadır (Qin, 2015).

### *Polimer matris kompozitler*

Polimer matris kompozitleri, termoset (epoksiler, fenolikler) veya termoplastik (polikarbonat, polivinilklorür, naylon, akrilikler) matrise gömülü cam, karbon, bazalt, çelik veya Kevlar liflerinden oluşur. Takviyenin esas olarak kırılma tokluğunu arttırmak için kullanıldığı bir seramik matris kompozitin aksine, polimer matris kompozitlerde takviye elemanı yüksek mukavemet ve sertlik sağlar. Polimer matris kompozitlerinin avantajları arasında, hafifliği, yüksek sertliği ve mukavemeti ve metallere kıyasla üstün korozyon ve yorulma direncine sahip olması sayılabilir. Polimer matris kompozitler geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Tezin ana konusu günümüzde önemi her geçen gün artan bu polimer matris kompozitlerin mekanik, kimyasal, yapısal karakterizasyonu ve radar emilim ölçümleri üzerinedir.

### *Parçacık takviyeli kompozitler*

Parçacık takviyeli kompozitler, matris içinde rastgele dağılmış çeşitli boyut ve şekillerdeki parçacıklardan oluşur. Resim 2.2 (a) durumunda, milimetre veya daha büyük boyutlardaki büyük parçacıklar, ana yük taşıyıcılarıdır ve ortak yüzeylerinin etrafındaki matrisin deformasyonunu kısıtlamaya eğilimlidirler, (b) durumunda ise matris, mekanik bir strese maruz kaldığında yükün büyük kısmını taşır. Bu durumda mukavemet artışı mekanizması atom seviyesinde gerçekleşir ve dislokasyon çizgilerinin matris boyunca dağılmış parçacıklar tarafından yayılmasının engellenmesini içerir.

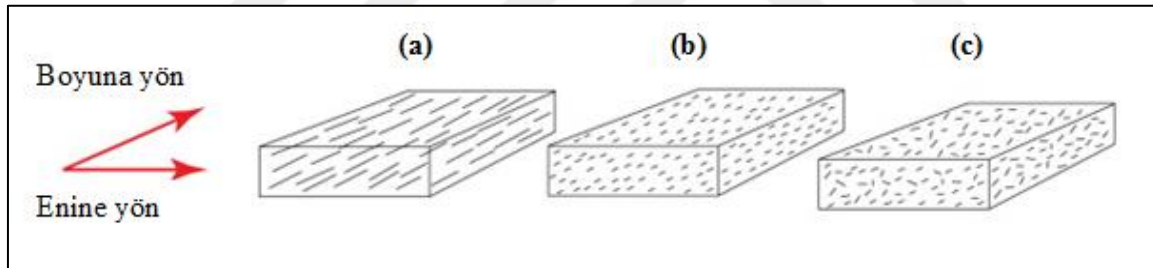


Resim 2.2. Parçacık takviyeli kompozitlerin türleri (a) büyük parçacıklı, (b) nano boyutlu

Parçacık takviyeli kompozitler, geliştirilmiş mukavemet, artan çalışma sıcaklığı, oksidasyon direnci, yüksek sürünme direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi avantajlara sahiptir (Kaw, 2006: 16). Tipik uygulama örnekleri, oyuncaklar, kasklar, otomobillerinin gövde panelleri, tamponlar ve emme manifoldlarıdır.

### 2.1.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, çok çeşitli takviye elyafları ve matris özelliklerini içeren yaygın olarak araştırılmış mühendislik malzemeleridir. Bir elyaf takviyeli kompozitte, fiber ve matrisin seçimi, uygulamaya ve kompozitin istenen mekanik mukavemetine bağlıdır. Bir kompozitin ortaya çıkan mukavemeti ve sertliği, sadece takviye elemanının bireysel özelliklerine değil, aynı zamanda lifli fazın uzunluk-çap oranına da bağlıdır. Bu orana ve fiber yönelimlerine bağlı olarak, fiber takviyeli kompozitler üç ana gruba ayrılmıştır: sürekli veya uzun ve hizalanmış, süreksiz veya kısa ve hizalanmış ve süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş (Resim 2.3).



Resim 2.3. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) sürekli ve hizalanmış, (b) süreksiz ve hizalanmış, (c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş (Egbo, 2020)

Elyaf takviyeli kompozitlerde, fiber yüzeyi ile matris arasındaki sınır arayüzey bölgesi olarak adlandırılır. Belirli bir gerilme altında, çatlak büyümesi arayüzey bölgesine ulaşana kadar devam eder. Zayıf arayüzey yapışması, lifin geri çekilmesine yol açarken, fiber-matris arayüzü boyunca güçlü yapışma, gerilmeyi matristen fibere aktarır ve elyaf takviyeli kompozitin mekanik özelliklerini fiber kırılmasına kadar artırır. Bu nedenle, fiber matris arayüzeyi, kompozitin performansını belirlemek için çok önemlidir (Chen, Wang ve Zhao, 2018; Hayward, Johnston, Dougherty ve De Silva, 2019; Zhang ve diğerleri, 2020). Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemeleri bu bölümde tanıtılacaktır.



### *Matris malzemeleri*

Polimer matris kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri termoplastik ve termoset bazlı reçine sistemi olarak sınıflandırılabilir. Kompozitlerin mekanik özellikleri, özellikle de gerilme özellikleri esas olarak takviye malzemesine bağlıdır, ancak matrisin rolü de göz ardı edilmelidir (Wang, S. Zheng ve Y. Zheng, 2011: 101). Polimer matris kompozitlerin geliştiği ilk günlerde, termoset tabanlı matris sistemleri yaygın olarak kullanılmıştır. Termoset matris esaslı kompozitler ile üstün mekanik özellikler elde etmek mümkün olsa da, epoksi tabanlı kompozitlerde birçok kusur keşfedilmiştir. Bu durumda termoplastik bazlı matrislerin icadına yol açmıştır (Mahesh, Joladarashi, Satyabodh ve Kulkarni, 2020). Termoset ve termoplastik matrislerin özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

#### Termoset matrisler

Polimer matris kompozitlerde çok çeşitli termoset reçinelerin kullanılmaktadır. Epoksi, etilen ko-vinil-asetat (EVA), polyester, vinil-asetat, fenolik, doymamış polyester, doymamış ve hızlandırılmış ortoftalik polyester, doymamış izoftalik polyester ve fenol formaldehit en sık kullanılan termoset bazlı reçinelerdir. Termosetler, kütleme aşamasında çapraz bağlanmış polimer zincirlerine sahiptir, bu da sonunda yeniden şekillendirilemeyen sert bir ürüne yol açar (Erden ve Ho, 2017: 51-79).

#### Termoplastik matrisler

Termoplastikler, termosetlerin aksine, daha fazla ısıtılabilir ve yeniden eritilebilir, bu da yeni bir ürün olarak yeniden şekillendirilmesine ve bu nedenle termosetlere kıyasla daha geniş bir şekilde geri dönüştürülmesine izin verir. Poliamid, polietilen, polipropilen, termoplastik poliüretan, polikarbonat, polisülfon, polifenilen sülfür, termoplastik polimer matrisinin yaygın örnekleridir.

Çizelge 2.1. Termoset ve termoplastiklerin özellikleri

<b>Özellik</b>	<b>Termoset</b>	<b>Termoplastik</b>
Elastiklik	yüksek	orta
Çalışma sıcaklığı	düşük	yüksek
Tokluk	orta	yüksek
Viskozite	düşük	yüksek
Geri dönüştürülebilirlik	düşük	yüksek

### *Takviye malzemeleri*

Sürekli ve süreksiz elyaflar, partiküller gibi birçok takviye malzemesi kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. En çok kullanılan takviye malzemeleri ise elyaflardır.

#### Cam elyaf

Cam elyafları eriyiklerden oluşur ve silika için kum, alümina için kil, kalsiyum oksit için kalsit ve bor oksit için kolemanit gibi hammadde miktarını değiştirerek çeşitli bileşimlerde üretilir. Önde gelen cam elyaf türleri E-cam, yüksek mukavemetli (HS)-cam ve korozyona dayanıklı (CR)-camdır. İlk büyük sentetik kompozit takviye elemanı olan E-cam elyafları, başlangıçta elektrik yalıtımı uygulamaları için geliştirilmiştir, genel olarak kalsiyum alümino-borosilikat cam olarak adlandırılır ve diğer takviyelere kıyasla nispeten düşük elastik modüllere sahiptir. HS-cam, E-camdan daha serttir ve daha iyi yorulma ve sürünme direncine sahiptir (Cevahir, 2017: 99).

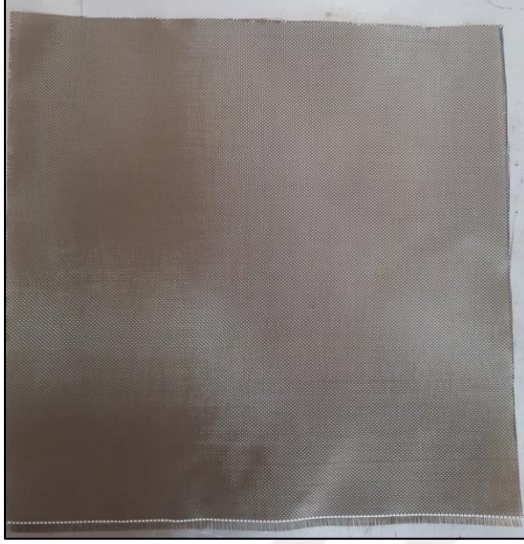
#### Bazalt elyaf

Bazalt elyaflar, termokimyasal bir işlemle volkanik bazalt kayaktan üretilir (Resim 2.4). Cam elyafla benzer bir kimyasal yapısı vardır, ancak daha üstün mekanik mukavemet, termal kararlılık ve kimyasal dirence sahiptir (Mahltig, 2018: 195; Matykiewicz Barczewski, Knapski ve Skórczewska, 2017). Bazalt elyaf, toksik olmaması, çevre dostu, işlenmesi kolay ve diğer elyaflardan daha ucuz olması nedeniyle mühendislik uygulamalarında özellikle polimer matris kompozitlerde takviye elemanı olarak önemli ilgi görmüştür (Khandelwal ve Rhee, 2020). Bazalt, cam, jüt, keten, aramid ve karbon elyafların özellikleri Çizelge 2.2’de karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada bazalt ve karbon elyaf kullanılmıştır.

Çizelge 2.2. Liflerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

<b>Fiber</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Çekme dayanımı (GPa)</b>	<b>Elastisite modülü (GPa)</b>	<b>Kırılmadaki % uzama</b>
E-cam	2,56	1,4-2,5	76	1,8-3,2
Karbon	<b>1,8</b>	<b>4,0</b>	<b>230-240</b>	<b>1,4-1,8</b>
Bazalt	<b>2,65</b>	<b>2,8</b>	<b>89</b>	<b>3,15</b>
Jüt	1,3	0,3-0,7	26,5	1,5-1,8
Keten	1,5	0,5-1,5	27,6	2,7-3,2
Aramid	1,44	2,9-3,4	70-179	2,4-3,6

Bazalt elyafların kimyasal, mekanik özellikleri ve maliyeti hammaddenin bileşimine bağlıdır. Yapı içerisindeki ana oksitler  $\text{SiO}_2$  (ağırlıkça %44-47),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ağırlıkça %11-13),  $\text{CaO}$  (ağırlıkça %10-12) ve  $\text{MgO}$  (ağırlıkça %8-11)' dir. Diğer oksitler ağırlıkça %5'den az oranda bulunmaktadır (Deák ve Czigány, 2009).



Resim 2.4. Dokuma bazalt elyaf kumaş

Cam fiber veya asbest elyafı gibi geleneksel elyaflarla karşılaştırıldığında, bazalt elyaf birçok polimer matrisle iyi uyumluluk gösterir ve epoksi, polyester ve vinil ester reçineleri gibi termoset polimerlerin güçlendirilmesinde sıklıkla kullanılır. Bazalt elyaf ile takviye epoksi matrisin, darbe direnci, eğilme mukavemeti ve Young modülü artar (Matykiewicz Barczewski, Knapski ve Skórczewska, 2017).

### Aramid elyaf

Aramid veya aromatik poliamid lifleri, esas olarak polimer matris kompozitlerde ve balistik koruma için kullanılan yüksek modüllü organik takviyelerdir. Birkaç üretici tarafından üretilen bir dizi ticari aramid elyafı vardır. Diğer takviyelerle kıyaslandığında, bunlar farklı özelliklere sahip özel malzemelerdir. Çizelge 2.2'de, yaygın olarak kullanılan bir aramid elyaf olan "Kevlar 49"un özellikleri gösterilmektedir. Karbon elyaflarla karşılaştırılacak olursa, aramid elyaflar doğrusal olmayan gerilme-uzama eğrilerine sahiptir (Zweben, 2005).

### Karbon elyaf

Karbonlaşmış akrilik elyaf, katran ve naylondan meydana gelen karbon elyaflar (Resim 2.5), iyi mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine sahip olduklarından polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Rezaei, Yunus ve Ibrahim, 2009). Kompozit takviyelerindeki ilk gelişmelerden biri karbon elyafın kullanılmasıdır. 1969'da, karbon fiberlerle güçlendirilmiş saf bir silika matrisi ile deneysel bir kompozitin üretimi ve karakterizasyonu üzerine ilk makale yayınlandı (Varley ve diğerleri, 2019).



Resim 2.5. Dokuma karbon elyaf kumaş

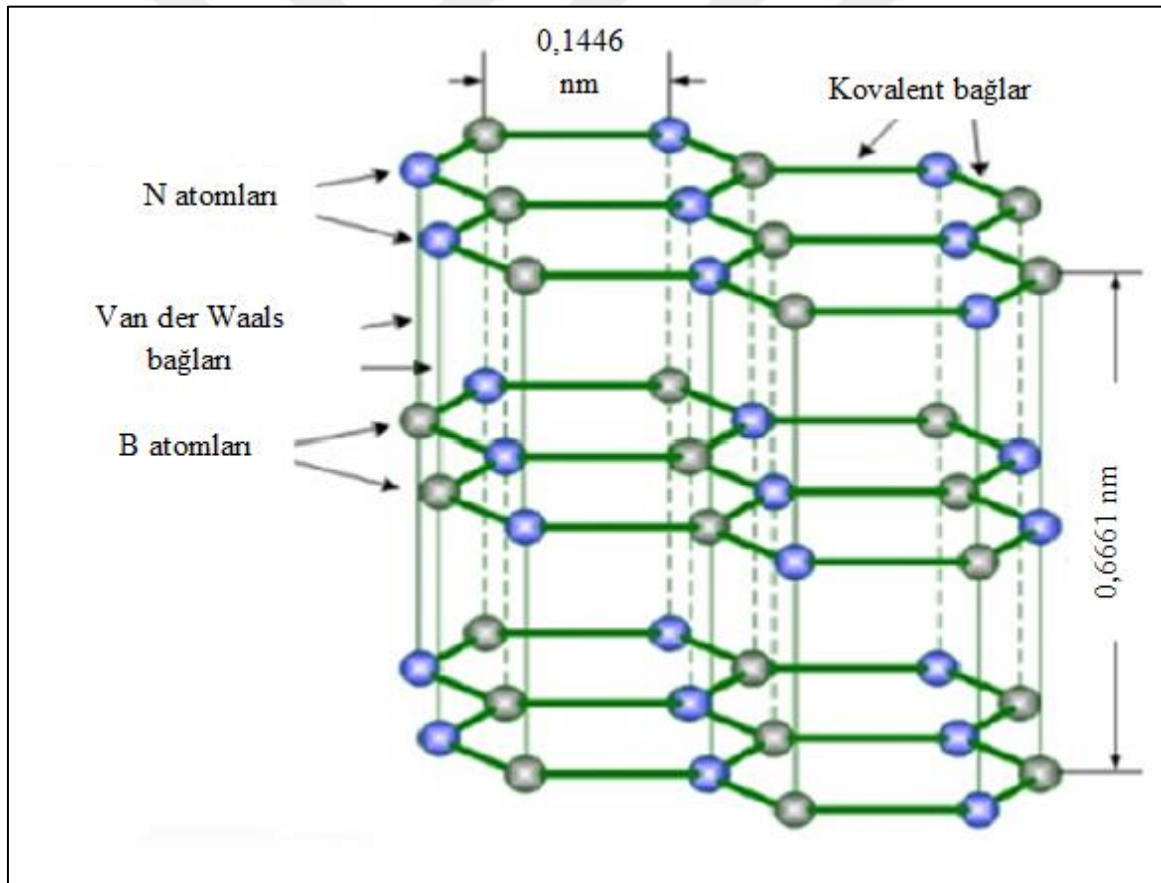
Şu anda karbon elyafların en büyük kullanıcısı metal muadillerinden çok daha hafif ve mukavim olması nedeniyle havacılık endüstrisidir. Mukavemeti ve sertliği cam ve aramid elyaflardan daha yüksektir. Ancak tüm karbon elyaflar havacılık sektöründe kullanıma uygun değildir. Karbon fiberlerin özellikleri ve performansı, üretim sürecine ve başlangıç malzemelerine büyük ölçüde bağlıdır (F.K. Wang, 2017).

### *Partiküller*

Kompozitlerdeki partikül takviyesi ile mukavemet artışı lif takviyesi ile artıştan daha azdır. Partikül takviyeli kompozitler esas olarak sertlikte kazançlar elde eder, ancak aynı zamanda mukavemet ve toklukta da artışlar elde edebilirler. Ancak her durumda, iyileştirmeler fiber takviyeli bir kompozitte elde edilenden daha düşüktür. Parçacık takviyeli kompozitlerin ana avantajı, fiber takviyeli kompozitlere kıyasla düşük maliyet, üretim ve şekillendirme kolaylığıdır (Tanzi, Farè ve Candiani, 2019: 3). Bu çalışmada partikül takviye maddesi olarak bor nitrür kullanılmıştır.

### Bor nitrür

Bor nitrür, eşit oranda bor (B) ve azot (N) atomlarının tüm yapılarıyla sentezlenmesiyle oluşan ve doğada bulunmayan kimyasal bir bileşiktir (Resim 2.6). İlk olarak W. H. Balmain tarafından 1842'de borik asit ve kalsiyum siyanürden sentezlenmiştir (Eichler ve Lesniak, 2008). Karbon ile izoelektroniktir ve bu nedenle “beyaz grafit” olarak da bilinir. Yüksek termal şok direncine, anizotropik termal özelliklere, iyi dielektrik özelliklere ve düşük mukavemete sahip çok önemli bir inert malzemedir. Üç tip polimorfa sahiptir, bunlardan biri hegzagonal bor nitrürdür (Wenchao, Wenjie, Zhiping, Gang ve Bin, 2019). Hegzagonal bor nitrür (h-BN), altı üyeli halkalar halinde düzenlenmiş B atomları ve N atomlarından oluşur ve bunlar birbirlerine van der Waals bağları ile bağlanmıştır (Wu ve diğerleri, 2020).

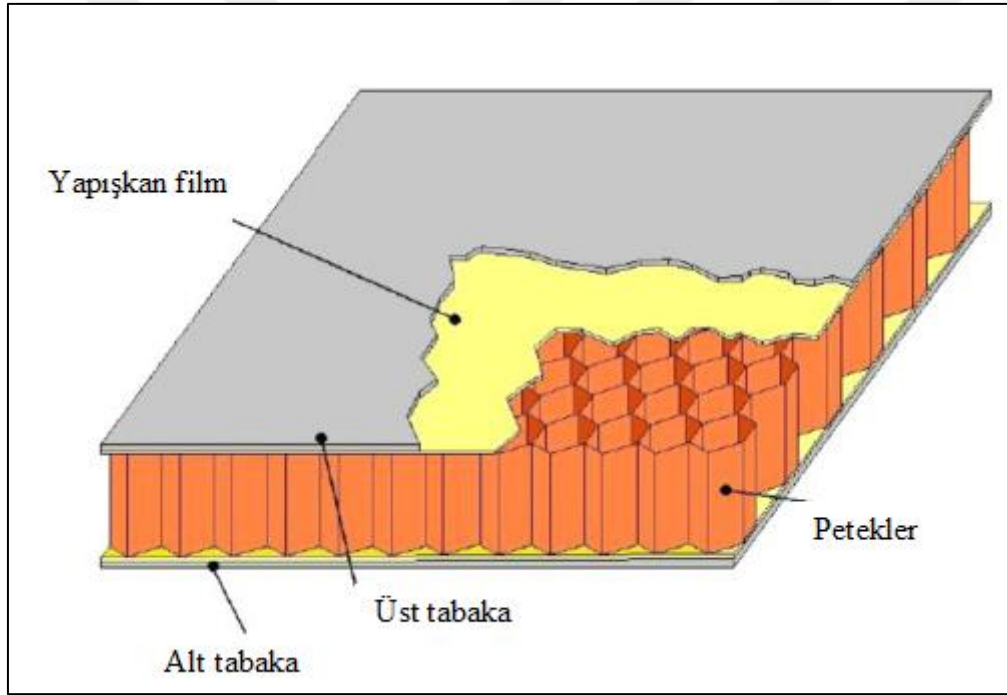


Resim 2.6. Hegzagonal bor nitrür yapısı (Majety ve diğerleri, 2012)

Hegzagonal bor nitrür, ısıya dayanıklı ve elektriksel olarak yalıtım malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan, düşük yoğunluklu oda sıcaklığında kararlı bir fazdır (Brant, Brunetta ve Aitken, 2013).

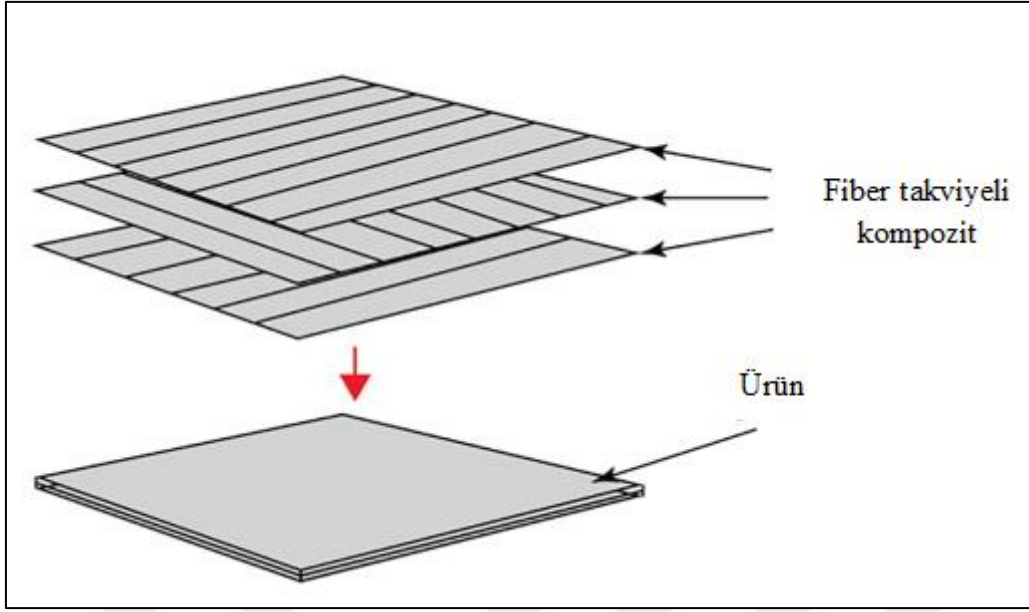
### 2.1.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın homojen bir yapışkan malzeme ile bir arada tutulmasıyla oluşan kompozit sistemdir. Kompozitin mekanik ve yapısal bütünlüğü, bileşenlerin her birinin bireysel bileşimlerinin özelliklerine ve ayrıca şekil ve boyut gibi geometrik tasarımlara bağlıdır (Tsai, 2017: 106-108 ). İki ana yapısal kompozit türü vardır: laminar kompozitler ve sandviç paneller. Sandviç yapının karakteristik özelliği, bir veya daha fazla yüksek mukavemetli dış katmandan ve bir veya daha fazla düşük yoğunluklu iç katmandan (çekirdek) oluşan çok katmanlı bir yüzeylerin kullanılmasıdır (Resim 2.7).



Resim 2.7. Sandviç kompozit yapımı (Castanie, Bouvet ve Ginot, 2020)

Laminer kompozit, farklı yönlenmelere sahip iki boyutlu tabakaların bir araya getirilmesi ile yapılır (Resim 2.8). Güçlü ve zayıf arayüzlere sahip çok katmanlı kompozitler olmak üzere iki gruba ayrılırlar (Bazhin ve diğerleri, 2021).



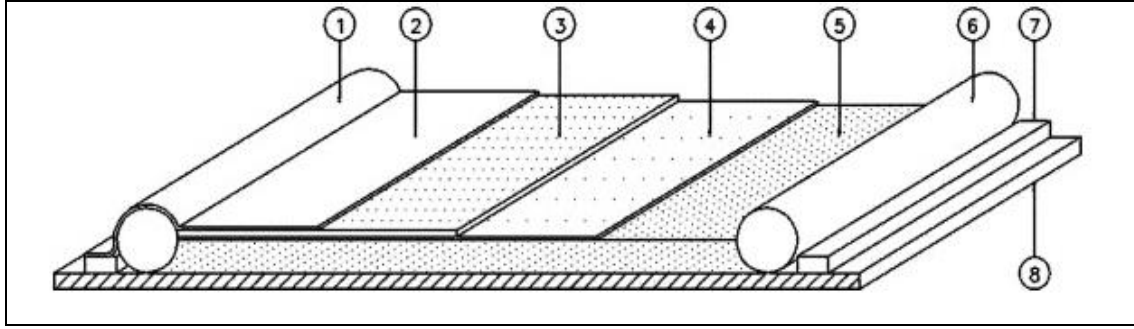
Resim 2.8. Laminer kompozitlerin şematik gösterimi (Egbo, 2020)

#### *Tabakalı kompozitlerin üretim yöntemleri*

Kompozitler farklı tekniklerle, bazen iki veya daha fazla işlemin bir kombinasyonu olarak üretilir. Üretim yöntemleri, kullanılan matris veya fiber malzeme tipine, ürün boyut ve geometrisine göre seçilir. Bu çalışmada kullanılan kompozitler vakum torbalama ve elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir.

#### *Vakum torbalama yöntemi*

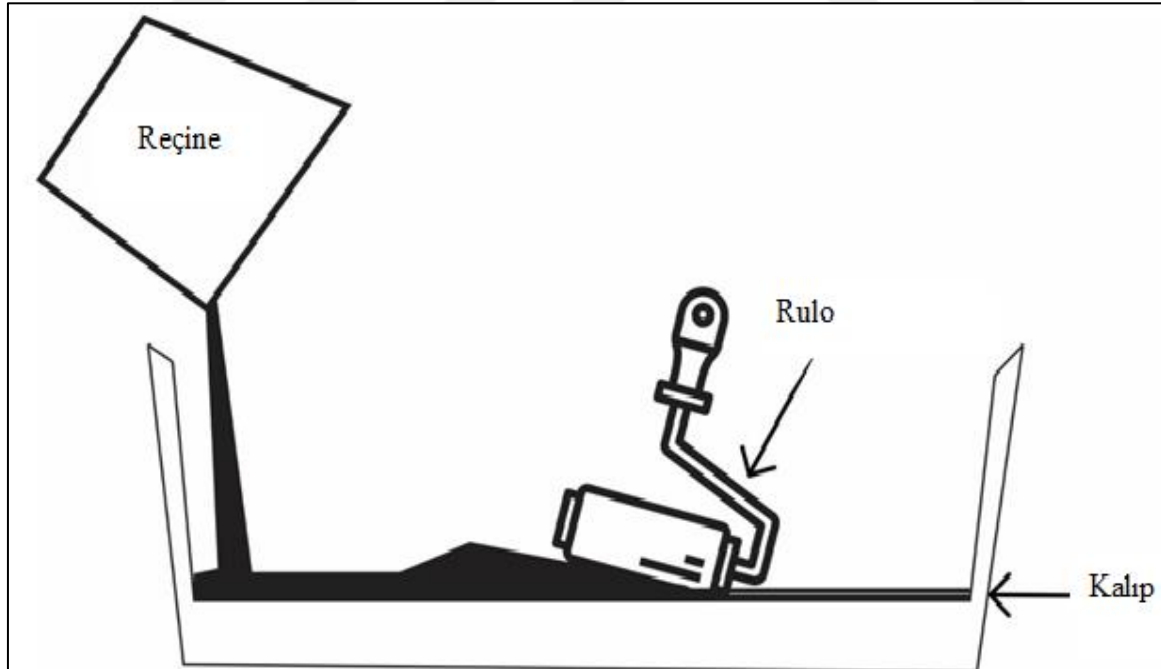
Vakum torbalama yöntemi, reçineyi elyaflara yedirmek için vakum basıncını kullanan bir tekniktir. Kalıp jelkotlanabilir, vakum torbası kalıp çevresine yerleştirilir ve malzemeler kalıba serilir. Takviye elemanı üzerine uniform bir reçine dağılımının sağlanması için delikli bir akış filesi yerleştirilir ve vakum torbası kapatılır. Reçine uygulanmadan önce vakum uygulanıp malzemeler sıkıştırılır ve sistemin ortamdaki izole edildiğinden emin olunur. Tam bir vakum elde edildikten sonra, sistem içerisindeki fazla reçine dikkatlice yerleştirilmiş spiral boru vasıtasıyla malzemelerden çekilir. Kurlenme tamamlandıktan sonra sistem sökülerek ürün ortaya çıkarılır. Vakum torbalama çok yüksek reçine/elyaf oranları sağlar, bu nedenle elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri üstündür (Spasojevic, 2019).



Resim 2.9. 1- giriş, 2-vakum torbası, 3- akış filesi, 4- soyma kumaşı, 5- takviye elemanı, 6- çıkış, 7- vakum contası, 8- kalıp (Correia ve diğerleri, 2005)

### Elle yatırma yöntemi

En az miktarda ekipman gerektirdiği için yaygın olarak kullanılan geleneksel bir kompozit üretim yöntemidir ve normalde büyük tek parça bileşenler üretmek için kullanılır (McBeath, 2000). Bu işlemde, açık bir kalıba bir jel kat uygulanır ve daha sonra fiber takviyeli polimer kompozit yapı yapmak için dokuma, örme, dikişli veya bağlanmış kumaşlar ardışık şekilde reçine (matris/bağlayıcı malzeme) ve fiber takviye katmanları manuel olarak uygulanır (Davim, Reis ve Antonio, 2004).



Resim 2.10. Elle yatırma yöntemi



Fırçalar ya da döner silindirler, şekildeki gibi hava kabarcıklarını gidermek ve reçineyi kumaşlara yedirmek için kullanılır (Resim 2.10). Katmanlar oda sıcaklığında sertleşene kadar bırakıldığı için kürtleme işlemi için ek bir ısıya gerek yoktur (Balasubramanian, Sultan ve Rajeswari, 2018).



### **3. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

#### **3.1. Giriş**

Kompozit malzemeler, yirminci yüzyılın ortalarında, modern teknoloji için yeni beklentiler sağlayan umut verici bir mühendislik malzemesi sınıfı olarak ortaya çıkmıştır. Genel olarak konuşursak, farklı özelliklere ve bileşenler arasındaki farklı sınırlara sahip iki veya daha fazla bileşenden oluşan herhangi bir malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılabilir. Tek tek bileşenlerle elde edilemeyen özelliklere sahip bir malzeme üretmek için çeşitli bileşenleri birleştirme fikri, insanoğlu tarafından binlerce yıldır kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak, uzun bir evrim sürecinin bir sonucu olarak ortaya çıkan malzemelerin çoğunluğu kompozit malzemeler olarak kabul edilebilir (Vasiliev ve Morozov, 2013: 1, 27).

İlerleyen bölümlerde, ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kompozitlerin mekanik özelliklerin araştırılması konusunda çok sayıda çalışma olmasına rağmen, karbon kumaş, bazalt kumaş ve hegzagonal bor nitrür katkılı kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması ile ilgili literatür çalışmasına rastlanmamıştır. Son olarak ilgili literatürde bulunan eksikler ortaya konmuştur. Bu tez çalışması ile tespit edilen boşlukları kapamak hedeflenmektedir.

#### **3.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar**

Elmahdy ve Verleysen (2020), yüksek uzama oranlarında bazalt ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme davranışını karşılaştırdılar. Yüksek uzama oranı deneyleri, bölünmüş bir Hopkinson çekme çubuğu kullanılarak gerçekleştirildi. Ek olarak, farklı uzama oranlarındaki davranışları karşılaştırmak için referans yarı statik deneyler yapılmıştır. Tüm uzama alanları stereo dijital görüntü korelasyon tekniği kullanılarak ölçülmüş ve uzama oranının her iki malzemenin gerilme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, bazalt kompozitlerin darbe direnci gerektiren uygulamalar için umut verici özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Vijay, Siva, Sreejith, Prabhakaran ve Devasia (2018), SiOC polimer türevli matristeki bor içeriğinin lif takviyeli kompozitlerin mekanik ve oksidasyon direnci özellikleri üzerine

etkisini incelemişlerdir. SiC/SiBOC seramik matris kompozitleri, Nicalon ve Sylramic silisyum karbür lifleri ve matris reçinesi olarak polyborosiloksan kullanarak imal etmişlerdir. SiC/SiBOC'nin 1000°C'deki oksidasyon davranışı, C/C ve C/SiBOC kompozitlerinininki ile karşılaştırılmış, kompozitlerin eğilme dayanımları ise oksidasyondan önce ve düzenli aralıklarla oksidasyondan sonra değerlendirilmiştir. Seramik matrisin oksidasyonu ile oluşan borosilikat tabakanın, Nicalon/SiBOC'yi daha fazla oksidasyondan koruduğunu tespit etmişlerdir.

Bir başka çalışmada ise, bor katkısının karbon fiber takviyeli lityum alüminosilikat cam seramik matris kompozitlerin kırılma davranışları üzerine etkisini Xia ve diğerleri (2016) incelemişlerdir. Sıcak pres yöntemi ile üretmiş oldukları kompozitlere ağırlıkça %0,6, %1,2, %1,8 ve ağırlıkça %2,4 oranlarında B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi yapmışlardır. Deneyler sonucunda bor ilavesinin, kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. En yüksek kırılma tokluğu değeri  $25,0 \pm 0,4 \text{ MPa m}^{1/2}$  ile %1,2 bor katkısının olduğu numunede görülmüştür. Bor katkılı kompozitlerin kırılma davranışı, arayüzey yapısı ile yakından ilgilidir. Bor katkısı ile karbon fiberlerin yüzeyinin grafitleşme derecesi artar. Arayüzey bölgesinde ortaya çıkan grafit kristalinin, kompozite yük uygulandığında çatlakları etkili bir şekilde saptırdığını ve bu durumun da kompozitlerin kırılma tokluğunun büyük ölçüde artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Fazio ve diğerleri (2020), plain dokuma kenevir-twill dokumaya sahip karbon kumaş kompozit panellerin düşük hızlı darbe davranışını incelediler. 15 katlı 300 mm × 300 mm ölçülerde sadece karbon kumaşlı, sadece kenevir kumaşlı ve 12 kat karbon+3 kat kenevir kumaşlı hibrit kompozitleri elle yatırma tekniği ile üretmişlerdir. Laminasyon aşamasından sonra, vakum altında oda sıcaklığında, 24 saat boyunca, 8 bar basınçta kürlenme için beklemişlerdir. Hibrit konfigürasyonunun sönümlenme ve darbe davranışını değerlendirmek için 10 J ve 20 J'de sönümlenme testleri ve düşük hız darbe testleri yapılmıştır. Sonuçlar, geleneksel karbon fiber takviyeli polimerlere kıyasla hibrit kompozit panelin daha sünek bir davranış gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

Demir (2017), karbon nanotüp katkılı cam-karbon kumaş/epoksi kompozit yapıların mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. 3 farklı enerji seviyelerinde yapılan düşük hızlı darbe deneylerinde karbon nanotüp takviyesi ile hasar alanının azaldığı ve delaminasyon direncinin arttığı tespit edilmiştir.

Singh, Y., Singh, J., Sharma, Lam ve Nguyen (2020), hindistan cevizi lifi/dokuma-karbon fiber/epoksi reçine hibrit kompozitin üretimi ve mekanik ve termal davranışının araştırılması üzerine yeni bir deneysel araştırma çalışması sunmaktadır. Kompozit numuneler, %30, %20 ve %10 lif ağırlığı yüzdeleri ile vakum torbalama tekniğini kullanarak üretilmiş ve hibrit kompozitlerin mekanik davranışı ASTM standartlarına (çekme, basma, eğilme ve darbe dayanımı) ve termal davranışı (Termogravimetrik analiz) göre incelenmiştir. Ayrıca, örneklerinin morfolojik karakterizasyonunu incelemek ve çekme testi sonrası hasar analizi hakkında bilgi sahibi olmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Sonuçlar hibrit kompozitin mekanik yüklemeye altında tek fiber takviyeli kompozitten daha sağlam özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Xu ve diğerleri (2018), yüksek sıcaklıklarda bor ve  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ile tavllanmış karbon fiberlerin bor nitrür (BN) ile kaplanması, antioksidan ve mikrodalga absorpsiyon özelliklerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen bulgular BN kaplamanın  $1000^\circ\text{C}$ 'de zor oluştuğunu,  $1100-1200^\circ\text{C}$ 'de üniform bir kaplamanın elde edildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, sıcaklığı  $1250^\circ\text{C}$ 'ye yükseltmek, tek tip bir BN kaplamanın oluşumunu sağlamasına karşın, kaplama yüzeyinde ayrık BN parçacıklarının oluşumunu tetiklemiştir. BN ile kaplanmış karbon elyafların oksidasyon direncinin ve mikrodalga emme özelliğinin önemli bir ölçüde arttığını tespit etmişlerdir.

Bir diğer çalışmada ise, borik asit ve üre kullanılarak kimyasal reaksiyon yöntemiyle azot ortamında pirolitik karbon (PyC) partikülleri bor nitrür ile kaplanmış ve mikrodalga absorblama özellikleri incelenmiştir (Zhou, Xiao ve Li, 2012). SEM, FT-IR ve XPS sonuçları ile başarılı bir şekilde bor nitrür kaplamanın yapıldığını ispatlamışlar ve TGA eğrileri ile de PyC partiküllerinin oksidasyon direncinin, yüzeye BN kaplanmasıyla geliştirildiğini göstermişlerdir. PyC parçacıkları ile BN kaplı PyC parçacıklarının mikrodalga emme özellikleri karşılaştırıldığında, kaplamalı parçacıkların daha düşük geçirgenliğe ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) ve daha iyi absorblama özelliğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Sujon, Habib ve Abedin (2020), vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile dokuma jüt elyafları (altı katman) ve karbon elyafları (dört katman) kullanarak dört farklı istifleme dizisi ve üç farklı lif yöneliminde kompozitler imal etmişlerdir. Çekme, eğilme, darbe ve su emme testleri, istifleme dizisinin ve fiber yöneliminin hibrit kompozitler üzerindeki etkisini değerlendirmek için ASTM standartlarına göre yapılmış ve deneysel sonuçlar,

fiber tabakalarının fiber yönelimi ve istifleme dizisinin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen hibrit kompozitlerin hafif yük taşıyan yapısal uygulamalar için umut verici bir malzeme olduğu tespit edilmiştir.

Zakaria ve diğerleri (2020), yapmış olduğu çalışmada karbon nanotüpler (CNT'ler), dokuma bir hibrit CF-CNT üretmek için elektrospray biriktirme yöntemi kullanılarak dokuma karbon fiberin (CF) yüzeyinde başarıyla biriktirildi. Gerilim ve püskürtme sürelerinin dokuma hibrit CF-CNT'nin morfolojisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Optimize edilmiş dokuma hibrit CF-CNT ile lamine edilmiş epoksi kompozit ve CNT olmadan sadece dokuma CF içeren kompozitler hazırlandı ve çekme ve termal özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, dokuma hibrit CF-CNT epoksi kompozit laminatların gerilme mukavemetinin Cnt katkısız kompozite göre, ~%21 arttığını, gerilme modülünün ~%37 arttığını, interlaminar kesme mukavemetinin ~%25 arttığını ve termal iletkenliğinin ~%35 arttığını göstermiştir.

M. Wang ve diğerleri (2020), Hildewintera-colademonis benzeri hegzagonal bor nitrür/karbon nanotüp kompozitini imal edip ve mikrodalga emme özelliklerini araştırdılar. Kompozitler, saplar olarak gözenekli h-BN mikrorodlar ve dikenler olarak CNT'ler içerir. Elde edilen ürünler için çeşitli molar oranlarda borik asit, melamin ve CNTs kullanılmıştır. 2-18 GHz aralığında kalınlıkları 1,0-6,0 mm aralığında olan bu h-BN@CNT kompozitlerin, mükemmel mikrodalga emilimine sahip olduklarını bulmuşlardır.

Başka bir çalışmada, hegzagonal bor nitrür nanokristal/grafit nanoflake (h-BNNC/GNF) kompozitleri yerinde ısıl işlem prosesi ile imal edilmiştir. Orijinal grafit nanoflakes ve h-BNNC/GNFs arasındaki mikrodalga emme özelliklerini karşılaştırmışlar ve 2,0 mm kalınlığında, h-BNNC/GNF kompozitleri X-bandından Ku-bandına daha iyi bir elektromanyetik mikrodalga emme performansı ortaya koyduğunu tespit etmişlerdir (Zhong ve diğerleri, 2017).

Bai ve diğerleri (2019), bilyalı öğütme işlemi ile çok katmanlı grafen/hegzagonal bor nitrür nanopartikül melezleri üretti ve numunelerin mikrodalga absorpsiyon özelliklerini araştırdı. Ağırlıkça %40 oranında h-BN nanopartikülleri kullanılarak elde edilen çok

katmanlı grafen/h-BNNP melezi kalınlığı 3,29 mm olduğunda 8,04 GHz'de -67,35 dB'lik son derece düşük yansıma kaybı değeri gösterdi.

Ayan ve diğerleri (2020), pamuk ve karbon kumaş takviyeli kompozitleri üretti ve mekanik ve radar emilimi özelliklerini araştırdı. Pamuk kumaş takviyeli kompozit plakanın düşük mekanik değerler sergilediğini, ancak belirli frekans aralıklarında karbon kumaş katkılı kompozit plakadan daha yüksek elektromanyetik dalga emilimi gösterdiğini bulmuşlardır.

Epoksi reçinenin bor nitrür ile modifikasyonu üzerine Lee ve diğerleri (2013) yapmış olduğu çalışmada Young modülünün önemli ölçüde değişmemiş olsa da, epoksi reçinenin mukavemetinin arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca polimerik kompozitlerin mekanik özelliklerinin yüksek dolgu içeriği ile bozulduğu da görülmüştür.

Subagia, Kim, Tijing, Kim ve Shon (2014), karbon ve bazalt kumaşlı hibrit kompozit laminatların farklı istifleme dizilerinin eğilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hibrit kompozitler, vakumlu reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üç noktalı eğilme testi yapılmış ve kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Mevcut sonuçlar, hibrit kompozit laminatların eğilme mukavemetinin ve modülünün, fiber takviye dizisine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Tüm istifleme dizileri pozitif bir hibridizasyon etkisi göstermiştir. Laminatların alt ve üst yüzeyinde karbon kumaş kullanılarak üretilen kompozit, bazalt kumaş kullanılarak üretilmiş kompozitten daha yüksek eğilme mukavemeti ve modülü sergilemiştir. Burada, hibrit kompozit laminatın mekanik özellikleri iyileştirmek için uygun bir bazalt ve karbon fiber istifleme dizisi bulunmuştur.

Sarasini ve diğerleri (2014), bazalt elyaf hibridizasyonunun karbon/epoksi laminatların mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkilerini ele almıştır. İki farklı istifleme dizisine (sandviç ve ara katkılı) sahip hibrit numuneler, 5, 12,5 ve 25 J olmak üzere üç farklı enerjide test edilmiştir. Sonuçlar, ara katmanlı konfigürasyona sahip hibrit laminatların daha iyi darbe enerjisi emme kabiliyetine ve tüm karbon laminatlara göre daha fazla hasar toleransına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca sandviç benzeri konfigürasyona sahip hibrit laminatların (laminatın merkezinde çekirdek olarak yedi karbon kumaş tabakası ve kompozitin her iki tarafı için üç bazalt kumaş tabakası) en yüksek eğilme davranışını sunduğunu rapor etmişlerdir.

Lim, Rhee, Kim ve Jung (2014), yapmış oldukları çalışmada, istifleme dizisinin karbon/bazalt/epoksi hibrit kompozitlerin eğilme ve kırılma özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sandviç formulu iki tip karbon/bazalt/epoksi hibrit kompozit üretmişlerdir: bazalt cilt-karbon çekirdek (BSCC) kompozitleri ve karbon cilt-bazalt çekirdek (CSBC) kompozitleri. Kırılma testleri sonrası kompozitlerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi. Sonuçlar, CSBC örneğinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün sırasıyla %32 ve %245 BSCC örneğinkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, CSBC örneğinin interlaminar kırılma tokluğu, BSCC örneğinkinden %10 daha küçüktür. Kırık yüzeyindeki SEM sonuçları, matris çatlamaının CSBC örneği için baskın bir kırılma mekanizması olduğunu, lifler ve epoksi reçine arasındaki arayüzey ayrılmasının da BSCC örneği için baskın bir kırılma işlemi olduğunu göstermiştir.

Feng ve diğerleri (2021), yapmış olduğu çalışmada farklı rijit-esnek yapıların karbon fiber(CF)/epoksi kompozitlerin arayüzey dayanımı üzerindeki etkisini anlamak için, CNTs önce karbon fiber yüzeyine kimyasal olarak aşılmalı ve daha sonra poliamid (PA) değişen anyonik polimerizasyon süresi ile CF-CNTs yüzeyine aşılmalıdır. Polimerizasyon süresi 12 saat olan CF/epoksi kompozitlerin optimum arayüzey kesme mukavemeti ve interlaminar kesme mukavemeti sırasıyla 86,7 ve 85,4 MPa bulunmuş, bununda işlenmemiş CF/epoksi kompozitten %77,6 ve %45,7 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak polimerizasyon süresi arttıkça, CF/epoksi kompozitlerin darbe tokluğu ve gerilme mukavemetinin arttığını ve CF/epoksi kompozitin iletkenliğinin azaldığını rapor etmişlerdir.

Vinci, Zoli, Galizia ve Sciti (2020),  $Y_2O_3$  ilavesinin karbon fiber takviyeli  $ZrB_2/SiC$  kompozitlerin mikroyapısı, termo-mekanik özellikleri ve oksidasyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.  $Y_2O_3$ ,  $ZrB_2$  ve  $SiC$  tanelerinin yüzeyinde bulunan oksit safsızlıkları ile reaksiyona girmiş ve sinterleme sıcaklığını etkili bir şekilde düşüren ve 1900 °C'de tam yoğunluğa ulaşmayı sağlayan bir sıvı faz oluşturmuştur. Mekanik özelliklerin, katkısız kompozite kıyasla önemli ölçüde geliştiğini tespit etmişlerdir.

Ashok ve diğerleri (2020), yapmış oldukları çalışmada luffa/karbon fiber hibrid polimer kompozitlerin mekanik performansını ve hasar mekanizmalarını araştırmışlardır. Luffa ve karbon elyafları, yüzde ağırlıkça 40/0, 20/20, 25/15 ve 15/25 oranlarında kullanılmıştır.

ASTM standartlarına göre yapılan test sonuçlarında, daha fazla karbon fiber hacmi ile mekanik özelliklerde iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir.

Rawat ve Singh (2017), çok duvarlı karbon nanotüpler kullanılarak karbon fiber laminatın hasar toleransındaki değişimini incelemişlerdir. Karbon nanotüp takviyesi reçine ağırlığının %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1'i olacak şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. Sekiz kat ve simetrik tasarıma sahip karbon fiber takviyeli kompozit laminatlar, elle yatırma ve 0.9 mm Hg basınçta vakum torbalama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sonuçlar, hasar toleransının çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi ile güçlendirilmesinin mümkün olduğunu ve maksimum hasar toleransını elde etmek için optimum katkılandırma değerinin ağırlıkça %0,25 olduğunu göstermiştir.

B. Wang, Fu, Li, Qi ve Liu (2021), grafit nanoplate'leri (GNP'ler) karbon kumaşların (CFs) yüzeyine kimyasal olarak aşılınmışlar ve GNP takviyesinin CFs/fenolik reçine kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Sonuç olarak grafit nanoplate katkılı kompozitlerin çekme mukavemetinin %47,5 oranında arttığını ve grafit varlığının kompozitin aşınma direncinde de önemli bir iyileşmeye sebep olduğunu rapor etmişlerdir.

### **3.3. Literatürde Oluşan Boşluklar**

Yapılan detaylı literatür çalışması sonucunda bu tez çalışmasında üretilecek olan kompozit yapılarla alakalı bir yayına rastlanmamıştır. Çalışmanın özgün kısmı iki farklı şekilde ele alınabilmektedir. Bunlardan birincisi; kaynaklarının büyük bir kısmı ülkemiz topraklarında bulunan bor ve bundan elde edilmiş bileşik olan hegzagonal nano bor nitrürün daha önce çalışılmamış bir alanda kullanılacak olması, ikincisi de üretilecek hibrit kompozit malzemelerin radar absorpsiyon ve mekanik özelliklerinin tayini ile kritik uygulama alanlarında (savunma sanayii, havacılık vb.) ilk kez kullanılacak olmasıdır. Hegzagonal nano bor nitrür ile yeni tip fiberlerin bir arada kullanımı ve bor nitrürün kompozit malzemenin özelliklerine etkileri ile ilgili literatürde tespit edilen açığa bu tez ile katkı sağlanacaktır. Yapılan literatür taraması sonucunda bazalt esaslı kompozitler, hegzagonal bor nitrür ile takviye edilmiş epoksi sistemleri, bazalt ve karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin mekanik ve termal davranışı üzerine çalışmaların olduğu görülmüştür, ancak yapılan tez çalışmasında nano bor nitrür katkılı hem bazalt hem de



karbon kumaşlı kompozitlerin ayrı ayrı üretiminin yanı sıra, literatürde bulunmayan nano bor nitrür katkılı bazalt ve karbon kumaş takviyeli üçlü hibrit kompozitlerin üretilip performans deneylerinin yapılacağı olması evrensel ölçekte yenilikçi bir yaklaşım olacaktır. Düşük dielektrik katsayısına sahip bor nitrür mikrodalga absorblayıcı malzeme üretiminde uygun bir elemandır (Zhou, Xiao ve Li, 2012). Bor nitrürün, radar absorblama kabiliyetinin artmasına neden olan katkı elemanı olarak kullanılmasıyla üretilen yeni tip hibrit kompozit ile havacılık radar uygulamalarında kullanılacak yeni bir malzeme geliştirilmiş olacaktır. Yine aynı sektörde, yüksek mekanik özellikler, yorulma ve korozyon direnci gösteren bu malzemenin kullanımı ile uçakların bakım ve onarımına harcanan maliyetin düşmesiyle ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır. Bor sektöründe dünya piyasasına hakim olan ülkemizde bu seviyede (üretim ve uygulamanın birlikte) bir doktora çalışmasının bu malzemeler kullanılarak ilk kez yapılıyor olması ayrıca önemlidir.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Amaç

Doğal, düşük ekolojik ayak izi, eşsiz ateş ve ısı performansı, iyi mekanik özellikler ve yüksek kimyasal direnç gösteren bazalt kumaş ile yüksek dayanım, yüksek rijitlik ve düşük ağırlığa sahip karbon kumaş ve hegzagonal nano bor nitrür takviye elemanı olarak kullanılarak polimer matrisli hibrit kompozit malzemelerin elle yatırma+vakum torbalama yöntemi ile üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, matris mikroyapısının mekanik özellikleri için epoksi reçine matrise, ağırlıkça farklı oranlarında hegzagonal nano bor nitrür ilavesi yapılması hedeflenmektedir.

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, eğme, darbe deneyleri yapılarak, nano bor nitrürün karbon, bazalt kumaş ve hibrit kompozitlerin içerisindeki varlığı, dağılımı gibi etkenlerin çekme, eğme ve darbe dayanımı üzerine etkileri incelenecektir. Kompozit plakaların kırınım desenlerini incelenerek yapısal ve kimyasal özellikleri belirlemek için XRD analizi, yapı içerisindeki organik bileşenleri belirlemek için ise FTIR analizi, termal özelliklerin belirlenmesinde ise DSC ve TGA analizleri yapılacaktır. Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)-EDS Mapping ile nano bor nitrürün dağılımları ve yapı morfolojisi incelenecektir. Kırılma yüzeyleri ise stereo mikroskop ile incelenecektir. Vektörel network analizör kullanılarak radar ölçümleri alınacaktır.

### 4.2. Malzemeler

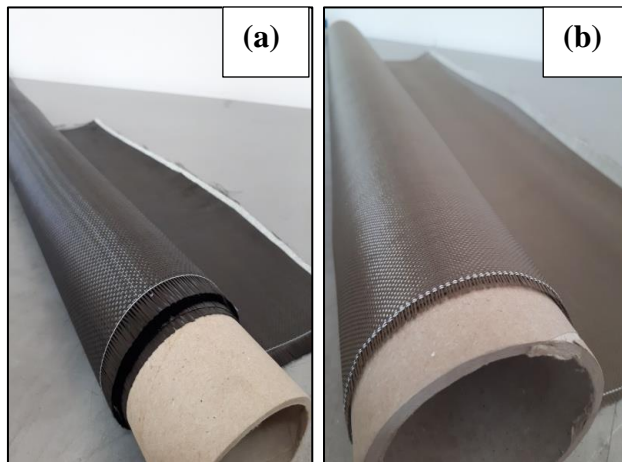
Bu çalışmada 12 farklı malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler temelde karbon kumaş, bazalt kumaş ve hibrit (karbon kumaş+bazalt kumaş) esaslı epoksi kompozitler olup içlerine mekanik ve radar absorpsiyon özelliklerinin gelişmesi için farklı oranlarda h-nBN nano partiküller eklenmiştir. Çalışmada kullanılan polimer esaslı matris malzemesi epoksi reçine olup Hexion marka LR160, sertleştirici olarak da LH160 kullanılmıştır (Resim 4.1). Takviye elemanları sırasıyla 200 g/m<sup>2</sup> plain dokuma bazalt kumaş ve 3K, 200 g/m<sup>2</sup> plain dokuma karbon kumaştan oluşmaktadır. Partikül takviyesi için ise BORTEK firmasından tedarik edilen %99,97 saflıkta ve ortalama tane boyutu 150 nanometrenin altında olan hegzagonal nano bor nitrür tozu kullanılmıştır. Kullanılan hegzagonal nano bor nitrür matris-elyaf arayüzey etkinliğini arttırmak için seçilmiş ve

herhangi bir fonksiyonelleştirme uygulanmamıştır. h-nBN'ler epoksi reçine+sertleştirici karışımı içerisinde ağırlıkça %0; %1; %2; %4 oranlarında katılmıştır. Çalışmada kullanılan epoksi:sertleştirici oranları ağırlıkça %80:%20 olarak seçilmiştir.

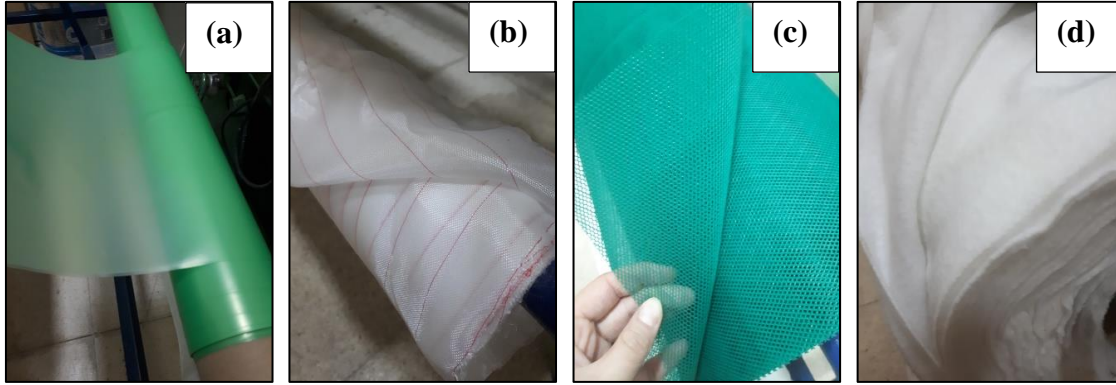


Resim 4.1. (a) hegzagonal nano bor nitrür, (b) epoksi, (c) sertleştirici

Bu tezde kullanılan karbon ve bazalt kumaşlar bir metre eninde 50 metrelik toplar halinde alınmış ve 30cm\*30cm ebatlarında kare olarak kesilmiştir (Resim 4.2). Reçine sertleştikten sonra kompozitin üretildiği zeminden daha kolay ayrılabilmesi için araya yerleştirilen soyma kumaşı (peelply) 35cm\*35cm ebatlarında kesilmiştir. Vakum edilen epoksinin ilerlemesini sağlayan infüzyon filesi 30cm\*30cm ebatlarında kesilmiştir. Vakum ortamını sağlayacak olan vakum torbası ise 50cm\*50cm ebatlarında kare olarak kesilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.2. (a) karbon elyaf kumaş, (b) bazalt elyaf kumaş



Resim 4.3. (a) vakum torbası, (b) PeelPly, (c) infüzyon filesi, (d) vakum battaniyesi

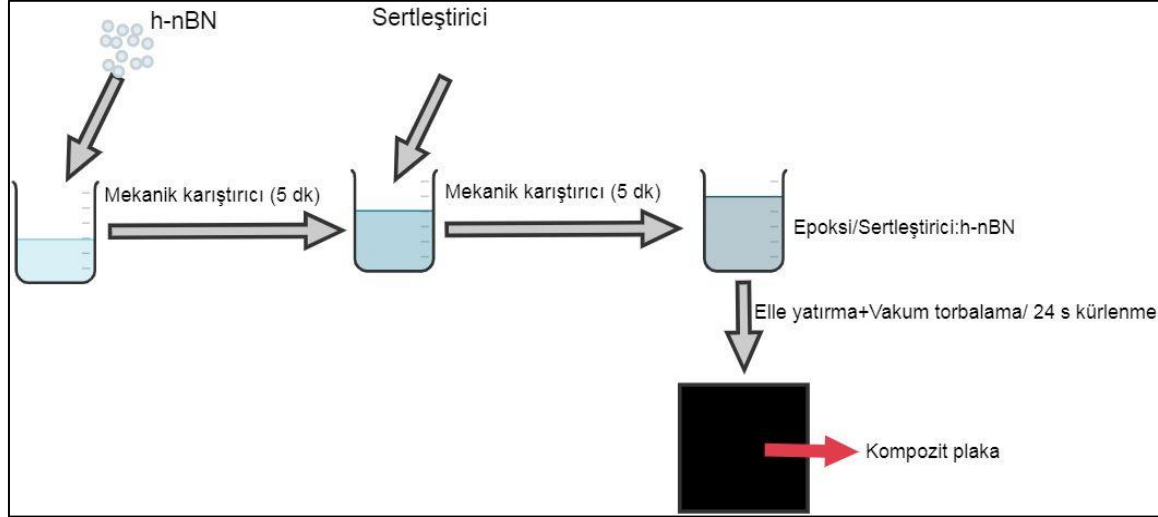
### 4.3. h-nBN Nano Partikül Takviyeli Epoksinin Hazırlanması

Hegzagonal nano bor nitrürün epoksi reçine içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için, uygun miktarlarda tartılan katkı elemanı epoksi içerisine alınarak 5 dk boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırılır. Ardından epoksinin özel sertleştiricisi katalog değerlerince hassas terazide tartılır ve hali hazırda bulunan epoksi+nano partikül karışımına eklenir. Epoksi, sertleştirici ve nano partikülden oluşan karışım 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırılır ve uygulama için hazır hale getirilir.

### 4.4. Elle Yatırma+Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Plakaların Üretimi

Vakum torbalama, reçine transfer kalıplama (RTM) ile benzerlikler sunan kapalı bir kalıp reçine infüzyon üretim prosesidir. En çarpıcı fark, RTM'de kullanılan tamamen kapalı, iki parçalı sert kalıpların bir vakum torbasıyla kapatılmış tek parçalı bir kalıpla değiştirilmiş olmasıdır. Öte yandan vakum torbalama metodu, düşük maliyetli, zaman tasarrufu sağlayan, tek yüzeyli bir kalıp ile gerçekleştirilebilen ve oda sıcaklığında da üretim yapılmasına imkân veren bir yöntemdir (Correia ve diğerleri, 2005). Vakum infüzyon yöntemi ile üretimde, nano partiküllerin kumaş aralarında süzülme, belli bölgelerde toplanma ve eşit dağılmama sorunları baş göstereceği yapılan literatür taraması sonucu tespit edilmiş bu nedenle elle yatırma+vakum torbalama olmak üzere iki üretim yöntemin eş zamanlı kullanımı ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Kalıplamanın yapılacağı bölge temizlendikten sonra vakum torbası sızdırmazlık bandı kullanılarak kalıba sabitlenmiş ve üzerine soyma kumaşı serilmiştir. Ardından nano partikül içeren epoksi+sertleştirici karışımı, rulo fırça yardımı ile her bir 30cm\*30cm ebadında ki 12 kat kare karbon, bazalt ve hibrit yapıdaki kumaşlara yedirilmiştir ve

böylece nano partiküllerin homojen olarak dağılması sağlanmıştır (Resim 4.4). Uçak gövdelerindeki katman sayıları (12-16) (York, 2017) dikkate alınarak kompozitlerin 12 tabakalı olmasına karar verilmiştir. Sonra tekrar belirlenen ölçülerde hazırlanmış soyma kumaşı ve ardından infüzyon filesi serilmiştir.



Şekil 4.1. Epoksi matrisli nanopartikül takviyeli kompozitlerin üretim prosesi

Vakum yapılacağı çıkış spiralleri elyafların etrafına kumaş uzunluğunda kesilerek vakum battaniyesi ile çevrelenerek yerleştirilmiştir. Son olarak en üst vakum torbası ile kapanıp, bütün sızmalar önlenecek şekilde vakum torbası sızdırmaz bantla yapıştırılmış ve olası kaçaklar kontrol edilmiştir. Sızdırmazlıktan emin olduktan sonra vakum pompası çalıştırılmış ve fazla olan epoksi kumaştan uzaklaştırılmıştır. Üretilen kompozit levhalar kürleme için oda sıcaklığında 24 saat boyunca bekletilmiş ve böylece üretim prosesi tamamlanmıştır. (Resim 4.5).

Çizelge 4.1. Üretilen malzeme grupları

Bazalt kumaş/epoksi (12 kat)	Karbon kumaş/epoksi (12 kat)	Bazalt+karbon kumaş/epoksi (3 karbon+6 bazalt+3 karbon)
Saf	saf	saf
% 1 h-nBN katkılı	% 1 h-nBN katkılı	% 1 h-nBN katkılı
%2 h-nBN katkılı	%2 h-nBN katkılı	%2 h-nBN katkılı
%4 h-nBN katkılı	%4 h-nBN katkılı	%4 h-nBN katkılı





Resim 4.2. Farklı oranlarda katkılandırma yapılmış kompozit plakaların görüntüleri

## 4.5. Malzeme Karakterizasyonu

### 4.5.1. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

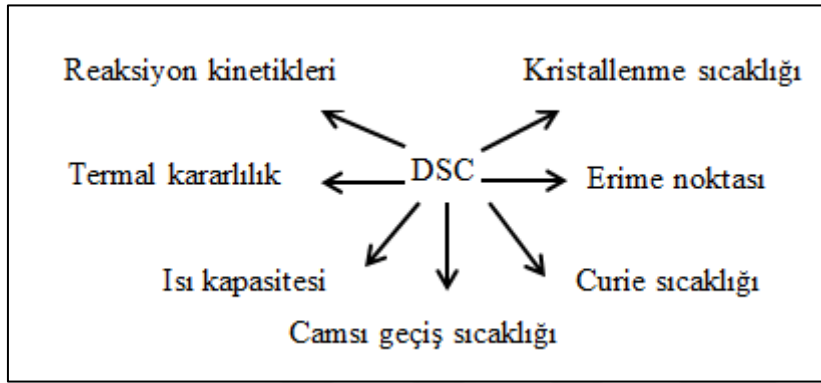
DSC, malzemelerde ısı ile meydana gelen değişimleri tespit etmede kullanılan bir termal analiz yöntemidir ve test materyali içeren bir numunenin bir referans numunesi ile karşılaştırılmasını kullanarak ısı transferinin ölçülmesini içerir (Drzezdzon, Jacewicz, Sielicka ve Chmurzynski, 2019). Her iki numune tutucunun sıcaklığı, 10°C/dk gibi sabit bir hızda arttırılır ve iki kaba verilen enerji  $H$ 'deki fark, her zaman aynı sıcaklıkta tutmak için ölçülür. Bu enerji dengesinden ısı akış hızı:

$$\frac{dH}{dT} = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

Burada;  $m$  = numune kütlesi,  $c_p$  = özgül ısı,  $dT/dt$  = programlanmış sıcaklık artış hızıdır.

Camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ısıtılan bir polimerde özgül ısı artarsa  $dH/dt$ , bir sabit değerden  $T_g$ 'de daha yüksek bir sabit değere geçmelidir. Bu nedenle,  $T_g$ ,  $dH/dt$ 'nin anlık numune sıcaklığında bir fonksiyonu olarak çizilmesiyle belirlenebilir.

Isı kapasitesi, camısı geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, erime sıcaklığı gibi özellikler polimer malzemeleri karakterize eder ve bunların tayininde DSC kullanılır (Schindler, Doedt, Gezgin, Menzel ve Schmölder, 2017) (Resim 4.6). Üretilen polimer matrisli kompozitlerin ölçümleri, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Mettler Toledo markalı termal analiz cihazında, 25°C-400°C arasında 10°C/dk hızla nitrojen atmosferinde  $T_g$  (camısı geçiş sıcaklığı), erime ve kristallenme sıcaklığı değerlerini elde etmek için gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.3. DSC kullanım alanları (Drzezdzon ve diğeri, 2019)

#### 4.5.2. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), bir numunenin havada veya kontrollü bir atmosferde ısıtılmasıyla meydana gelen ağırlık değişimini kaydederek malzemenin termal stabilitesini ve hızlı buharlaşan bileşenlerin fraksiyonunu belirlemek için kullanılan analitik bir tekniktir. Ürünlerin kütle değişimini belirlemek ve h-nBN'nin kompozitlerin termal stabilitesi üzerine etkisi hakkında bilgi edinmek için, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda Mettler Toledo marka TGA 3+ modeli TGA kullanılarak 25°C-700°C arasında 10°C/dk hızla nitrojen atmosferinde analizler gerçekleştirilmiştir.

#### 4.5.3. Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometre (FTIR) analizi

FTIR, malzemelerin spesifik bağları hakkında bilgi veren bir tekniktir ve iletim, yansıma ve zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) olmak üzere üç moda sahiptir (Harlow Lundgren ve Escudero, 2020). Kompozit plakaların FTIR spektrumu, örneklerdeki organik bileşenleri belirlemek, hegzagonal nano bor nitrür takviyesi ve epoksi matris arasındaki etkileşimi ortaya çıkarmak için Jasco 6700 model FTIR cihazı kullanılarak geçirgenlik



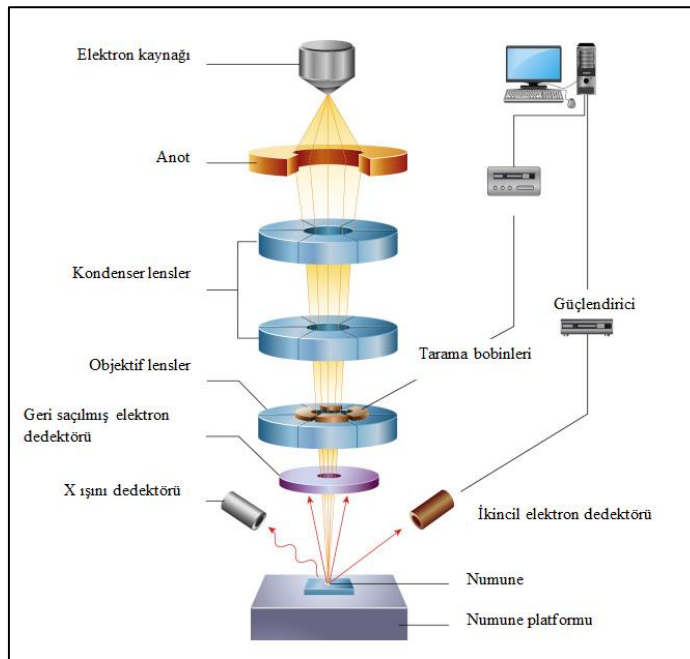
modunda kaydedilmiştir. Ölçümler, oda sıcaklığında 4000 ila 400  $\text{cm}^{-1}$  aralığında yapılmıştır.

#### 4.5.4. X-Işını difraktometresi (XRD) analizi

Kompozitlerin X-ışını kırınımı (XRD) desenleri, Cu  $K\alpha$  radyasyonlu çok amaçlı Thermo-Scientific marka Arl- $K\alpha$  difraktometresi ile belirlenmiştir. Ölçümler, 3°/dak tarama hızı ile 45 kV voltaj ve 40 mA akım uygulanarak İskenderun Teknik Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboravutarında yapılmıştır.

#### 4.5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)- EDS haritalama (Mapping) analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yüksek enerjili elektronların numune yüzeyini taraması ile görüntü oluşumuna olanak veren çok yönlü bir görüntüleme aracıdır. Birkaç KeV ila 30 KeV arasında değişen bir enerjiye sahip olan elektron demeti ile numunenin etkileşimi sonucu oluşan çeşitli elektron ve ışınların dedektörlerde toplanması ve bunların sinyal çoğaltıcılar ile senkronize çalışan bilgisayar yazılımı tarafından işlenmesi sonucunda görüntü elde edilmektedir (Resim 4.7). Bir SEM tarafından üretilen sinyaller, ikincil elektronları (SE), geriye saçılmış elektronları (BSE) ve karakteristik X-ışınlarını içerir.



Resim 4.4. Bir SEM mikroskobunun çekirdek bileşenlerinin şematik diyagramı (Inkson, 2016)

Bu çalışmada öncelikle, incelenecek olan kompozit malzemelerin mikro yapı görüntülerinin daha net alınabilmesi için, numunelerin yüzeyleri Quorum Q150R-ES marka kaplama cihazında vakum ortamında 45 saniye süreyle altın ile kaplanmış ve numunelerin iletkenlikleri sağlanmıştır. Görüntülemeler geri saçılmış elektron modunda, 10 kV da İskenderun Teknik Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında bulunan Thermo Scientific, Apreo S cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca SEM incelemeleriyle paralel olarak Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) Mapping uygulanan numunelerde element analizleri yapılarak ilave nano partiküllerin varlıkları ve yapı içindeki dağılımları araştırılmıştır.

## 4.6. Mekanik Testler

### 4.6.1. Tahribatsız muayeneler

#### *Ağırlık ölçümü*

Emilen reçine miktarını bulunabilmesi için kompozitler tartılmışlardır. Farklı katkı oranlarında, aynı ölçülerde üretilmiş numunelerin ağırlıkları kuru ağırlıklarına oranlanarak emilen reçine miktarı hesaplanmıştır. Plakaların ağırlık ölçümleri 0,1 g hassasiyetli terazi kullanılarak ölçülmüştür.

#### *Kalınlık ölçümü*

Kompozit levhaların kalınlıkları 0,01 mm hassasiyetli dijital kumpas kullanılarak ölçülmüştür (Resim 4.8).



Resim 4.5. Dijital kumpas ile kalınlık ölçümü

### Yoğunluk ölçümü

Düşük yoğunluğa sahip olmak kompozit malzemelerin önemli bir özelliğidir ve bu nedenle kullanımları günden güne artmaktadır. Üretilen malzemelerin teorik yoğunlukları sayısal yöntem ile Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan değerler Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$T_y = 100/(R/D + r/d) \quad (4.2)$$

Burada,  $T_y$ ; teorik kompozit yoğunluğu,  $R$ ; ağırlıkça reçine yüzdesi,  $r$ ; ağırlıkça takviye yüzdesi,  $D$ ; reçine yoğunluğu,  $d$ ; takviye yoğunluğudur.

Çizelge 4.3. Kompozitlerin üretiminde kullanılan epoksi reçine ve elyafların yoğunluk değerleri

Malzeme türü	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Bazalt fiber	2,65
Karbon fiber	1,8
Epoksi reçine	1,15

### 4.6.2. Çekme testi

Çekme testi, sadece malzemenin çekme gerilmesi altında gerilme-uzama davranışını değil, aynı zamanda malzemenin sünekliği hakkında bilgi elde etmek içinde kullanılan temel bir malzeme testidir (Komori, 2020). Tek eksenli gerilme altında malzemenin hasara uğratılmasını içerir.



Resim 4.6. Çekme testinden görüntüler

Akma mukavemeti, nihai mukavemet, toplam uzama ve kesit alanındaki azalma dahil olmak üzere çekme testlerinden birçok mekanik özellik belirlenebilir. Bu çalışmada üretilen kompozitlerin tek eksenli gerilme altındaki çekme mukavemetinin bulunabilmesi için ASTM D3039 standardına göre çekme testleri yapılmıştır. Çekme deneylerinde kullanılmak üzere her bir plaka için beşer adet toplamda 60 adet 25mm\*250mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. Hazırlanan numunelerin çekme testleri İnnoma Innovative Materials Technologies Inc. laboratuvarında Shimadzu marka çekme cihazında, 2 mm/dakika hızla yapılmıştır. Çekme testlerinden sonra incelenen örneklerde hasar modlarının tayini için stereo mikroskop ile görüntülemeler yapılmıştır.

#### 4.6.3. Üç noktalı eğilme testi

Üç nokta eğilme deneyi Resim 4.10'da verildiği üzere numunenin iki mesnet arasına konumlandırılıp orta noktasından mesnetlere zıt yönlü bir kuvvetin uygulanması ile yapılmaktadır. Eğilme deneyi ile malzemenin eğilme elastisite modülü ( $E_e$ ), eğilme dayanımı ( $\sigma_e$ ) ve eğilme miktarı ( $\varepsilon_e$ ) gibi değerler hakkında bilgi sahibi olunur. Buna göre maksimum eğilme gerilmesi Eş. 4.3 kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma_e = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.3)$$

Burada;

$F$ = Uygulanan kuvveti (N),

$L$ = Mesnetler arası mesafe (mm),

$h$ = Kiriş yüksekliği (mm),

$b$ = Kiriş genişliği (mm) olarak tanımlanmaktadır.

ASTM D-7264 standardına göre hazırlanan numuneler numunelerin genişlikleri 13 mm olup kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/32 olarak alınmıştır. Shimadzu marka deney makinesinde 1 mm/dk yük hızında teste tabi tutulmuşlardır.



Resim 4.7. Üç noktalı eğilme deneyinin uygulanması

#### 4.6.4. Izod darbe testi

Malzemelerin darbe direncini belirlemek için kullanılan ve adını İngiliz mühendis Edwin Gilbert Izod'dan alan bir test yöntemidir (Saba, Jawaid ve Sultan, 2019). Malzemeleri düşük sıcaklıkta test etmek için de kullanılır. Numunenin boyutu ve şekli, hangi tür malzemelerin test edildiğine bağlı olarak değişir. Metal örnekleri genellikle kare ve polimerler genellikle dikdörtgendir. Charpy testinden farkı numunenin dikey konumda bulunmasıdır. Kolunun ucunda belirli bir ağırlığa sahip bir sarkaçtan oluşan test cihazı dikey olarak bağlanmış numuneye çarpar ve numune tarafından emilen enerji hesaplanır (Resim 4.12). Numune çentikli ya da çentiksiz olabilir (Resim 4.11). Darbe dayanımı, sarkacın salınımındaki yükseklik kaybının tam olarak ölçülmesiyle belirlenir. Kırılma enerjisi Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanır.

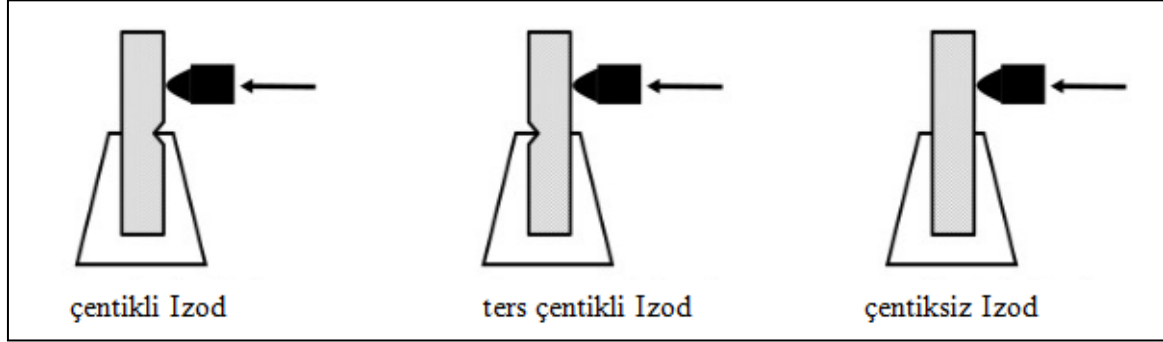
$$Kırılma\ enerjisi = G(h - h_1) \quad (4.4)$$

Burada;

$G$ = sarkacın ağırlığı (kg),

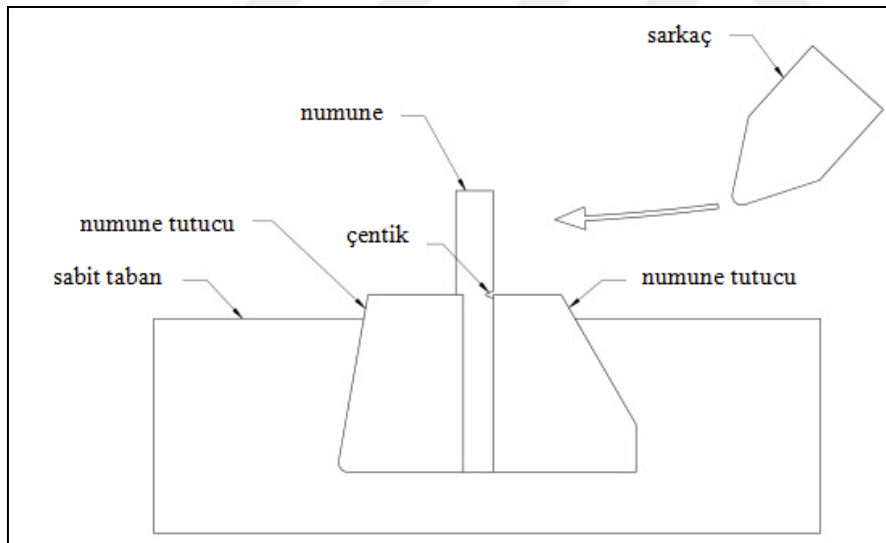
$h$ = sarkaç ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

$h_1$ = numune kırıldıktan sonra sarkaç ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m) olarak tanımlanmaktadır.



Resim 4.8. Izod darbe testi numuneleri (McKeen, 2014)

Izod darbe testleri, ASTM D256 standardına göre 15 J çekiçle donatılmış bir test makinesi kullanılarak İnnoma Innovative Materials Technologies Inc. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.9. Çentikli Izod test düzeneği (MacLean-Blevins, 2018)

#### 4.7. Mikrodalga Emilim Ölçümleri

Radar absorpsiyon ölçümleri Agilent PNA-L vektörel network analizör ve buna bağlı iki adet mikrodalga horn antenler kullanılarak İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır. Kullanılan Agilent PNA-L cihazı 10 MHz – 43,5 GHz arasında ölçüm yapmaktadır. Ölçümler serbest boşlukta, üretilen kompozit malzemeler olmadan, kalibre edildikten sonra

gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında, hazırlanan numune, vektörel network analizörünün ayrı bağlantı noktalarına bağlanan iki horn anteni arasındaki orta noktaya yerleştirilir. İki anten arasındaki mesafe, antenler arasına yerleştirilen numunenin refraktif alan bölgesinde olmadığından emin olmak için dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Absorblama için 3 mekanizma önem arz etmektedir. Birincisi, gelen sinyalin malzeme içerisine nüfuz etmesidir. Bunun için gelen ortam ile giriş ortamının (malzeme) empedans değerlerinin uyumu gözetilecektir. Bu uyum arttığında gelen sinyalin büyük kısmı yansıma olmaksızın malzeme içerisine nüfuz edecektir. İkinci mekanizma malzemenin ilgili frekansta kayıplı olmasıdır. Bu sayede malzeme içerisine giren sinyal malzemede yayılım yaparken hızla sönümlenir ve dolayısı ile sinyal emilmiş (absorbsiyon) olur.



Resim 4.10. Vektörel network analizör cihazı

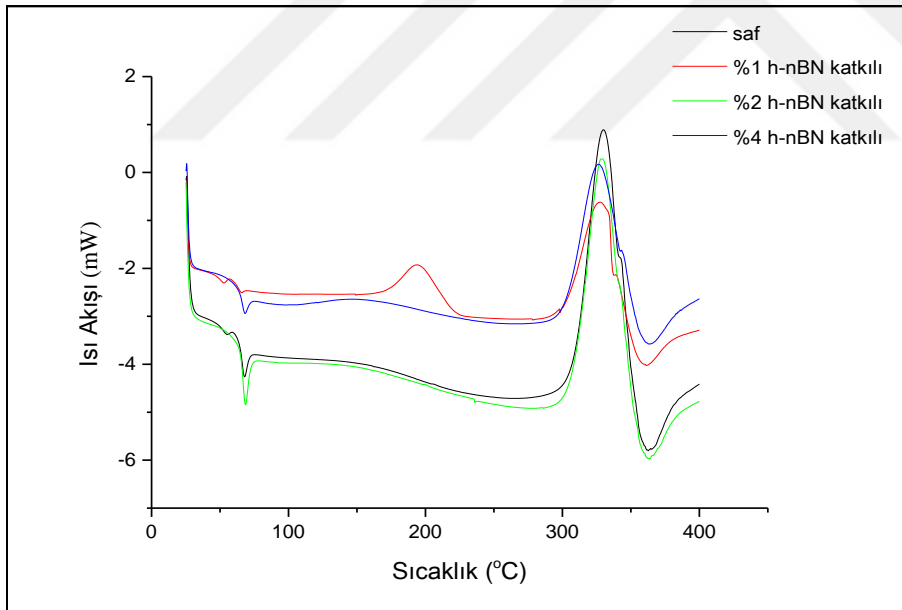
Üçüncü mekanizma ise önerilen malzemenin arka tarafına elektromanyetik sinyali tamamen yansıtacak bir metal tabaka koyarak iletimi de engellemedir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Malzeme Karakterizasyonu Sonuçları

#### 5.1.1. DSC analizleri

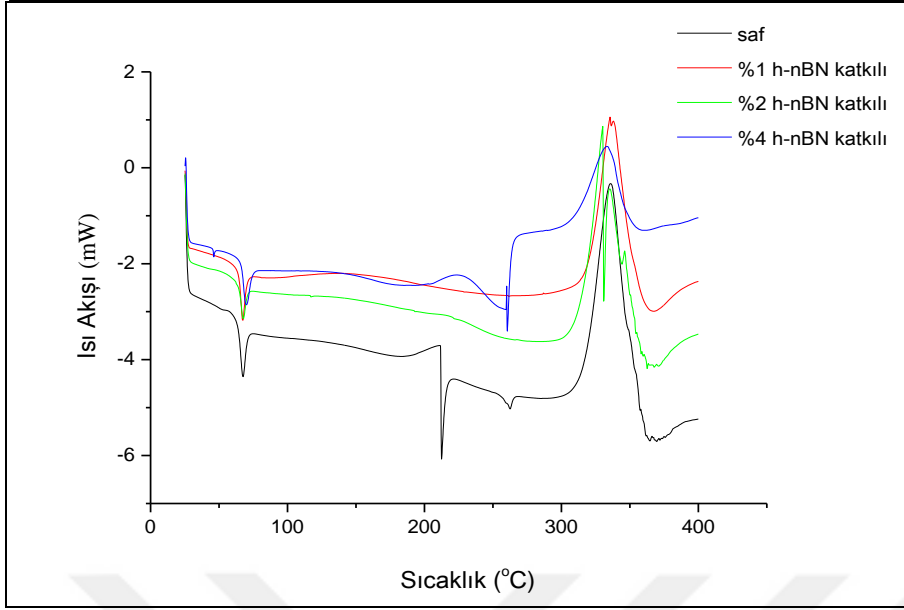
Camsı geçiş sıcaklığı,  $T_g$ , polimerler için önemli bir özelliktir. Bir polimer,  $T_g$ 'nin altında sert, kırılğan bir katı gibi davranır. Camsı bölgede, polimer zincirlerinin hareketi donar ve bağların gerilmesi ile uzama meydana gelir. Elastik modül, bu bölgedeki sıcaklık arttıkça azalır. Amorf bir polimer  $T_g$ 'nin üzerinde ısıtıldığında, polimer zincirlerinin hareket etme kabiliyeti nedeniyle yumuşak ve esnek olarak davrandığı elastik bir bölgeye girer (Kumar ve Gupta, 2003: 497).  $T_g$ 'yi ölçme yöntemlerinden biri, diferansiyel tarama kalorimetresinin kullanılmasıdır. Şekil 5.1-3'de ağırlıkça %0, %1, %2, %4 h-nBN içeren kompozitlerin DSC sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.1. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri

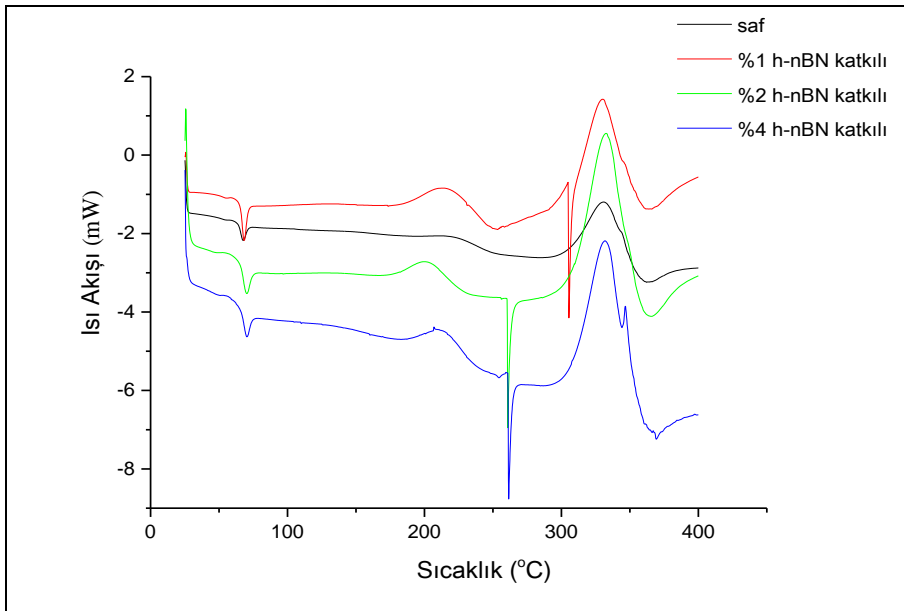
Bazalt kumaşlı üretimlerin sonuçları incelenecek olursa saf plakanın  $T_g$  değeri 53,07°C ve %1, %2, %4 h-nBN katkılı plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla 50,58°C, 66,25°C ve 65,58°C olarak belirlenmiştir. Ölçümlerdeki ortalama hata oranı %1,43'dür.





Şekil 5.2. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri

Şekil 5.2 irdelenecek olursa katkısız plakanın  $T_g$  değeri  $65,79^{\circ}\text{C}$  ve %1, %2, %4 h-nBN katkıli plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla  $65,64^{\circ}\text{C}$ ,  $65,66^{\circ}\text{C}$  ve  $67,84^{\circ}\text{C}$  olarak tespit edilmiştir. Ölçümlerdeki ortalama hata oranı %3,06'dır.



Şekil 5.3. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların DSC grafikleri

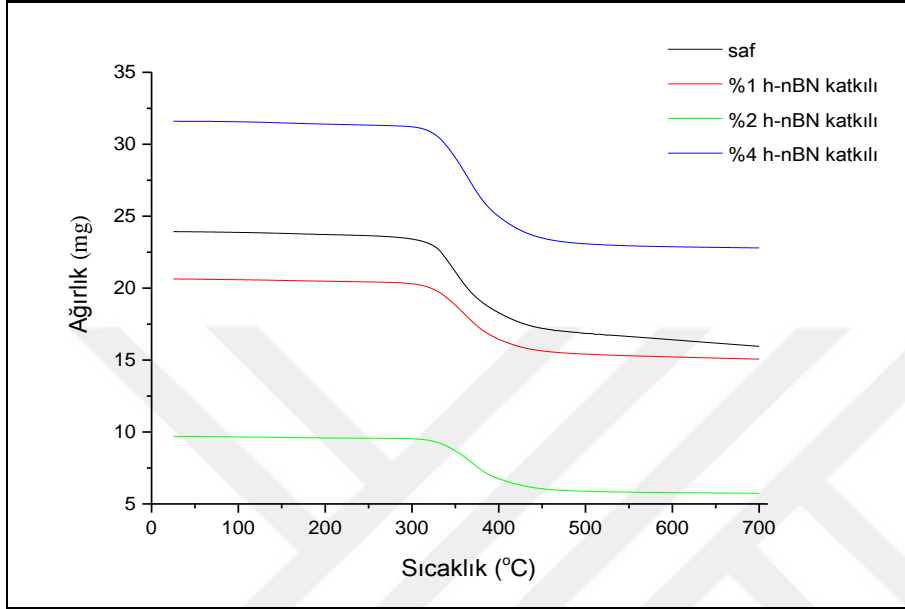
Hibrit kompozitlerin DSC sonuçlarında ise saf plakanın  $T_g$  değeri 65,38°C ve %1, %2, %4 h-nBN katkılı plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla 66,69°C, 67,46°C ve 67,53°C olarak tespit edilmiştir. Ölçümlerdeki ortalama hata oranı %2,61'dir.

$T_g$  değerlerinde katkısız numunelere kıyasla katkılandırma ile bir miktar arttığı ancak katkılandırma miktarının artışıyla ciddi bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Meydana gelen hafif artış serbest hacim ile açıklanabilir. Eğer katkı elemanı düzgün bir şekilde dağılırsa, daha fazla epoksi-nanotoz etkileşimi meydana gelir ve nanotoz yüzeyinde kısıtlı bir bölge oluşturulur. Nanotoz yüzeyindeki polimer zincirleri serbest hacmi azaltır ve dolayısıyla polimer zincirinin hareketliliği kısıtlanır ve çapraz bağlanma etkisi güçlenir bu da camsı geçiş sıcaklığında artışa neden olur (Zheng ve diğerleri, 2020). Bu durumda h-nBN eklenmesinin ve miktarının artmasının  $T_g$ 'yi yükseltmesi beklenir. Yapılan çalışmada çok az bir miktarda artış olduğundan genel yapı itibariyle katkılandırmanın malzemenin termal özelliklerinde kayda değer bir değişikliğe sebebiyet vermediği ve malzemenin termal olarak kararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Moniruzzaman, Du, Romero ve Winey (2006), yapmış olduğu çalışmada da tek duvarlı nanaotüp katkılı epoksi kompozitlerde  $T_g$  değerinin katkılandırma ile değişmediği rapor edilmiştir.

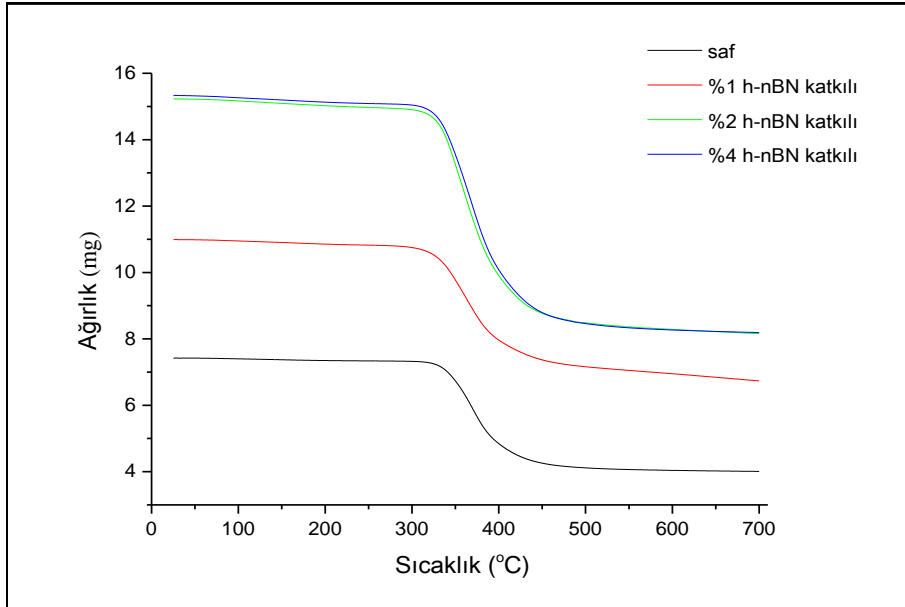
### 5.1.2. TGA analizleri

TGA, bir numunenin havada veya kontrollü bir atmosferde ısıtılmasıyla meydana gelen ağırlık değişimini kaydederek malzemenin termal stabilitesini ve hızlı buharlaşan bileşenlerin fraksiyonunu belirlemek için kullanılan analitik bir tekniktir. h-nBN'lerin epoksi matrisli kompozitlerin termal stabilitesi üzerindeki etkisi hakkında bilgi edinmek için kompozit plakaların termogravimetrik analizi yapılmıştır. Plakalardan yontularak elde edilen nanokompozit granülleri 10°C/dk. ısıtma hızı ile nitrojen atmosferinde 700°C 'ye ısıtılmıştır. Şekil 5.4-6'da ağırlıkça %0, %1, %2, %4 h-nBN içeren kompozitlerin sıcaklığa bağlı kütle kaybı sonuçları verilmiştir. Analize başlanan kütle miktarları aynı olmadığından y ekseninde başlangıç noktaları farklı değerleri göstermektedir. TGA eğrilerine dikkat edilirse toplam kütlenin yarıdan fazlasının korunduğu görülmektedir. Buradan fiber liflerinin de bulunduğu analiz numunelerinde tamamen buharlaşan kütlenin epoksi matrise ait olduğu anlaşılmaktadır. Kütle kaybının başlangıç sıcaklığı, h-nBN'lerin epoksi matrisine dahil edilmesiyle kayda değer bir değişiklik göstermemiştir.

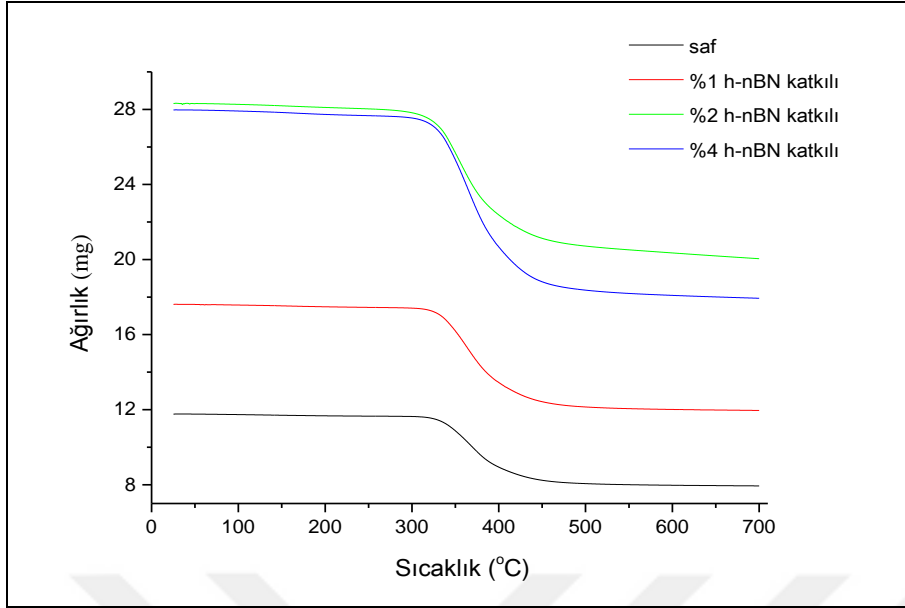
Tüm kompozitlerin TGA eğrileri incelendiğinde tek aşamalı bir bozunma gerçekleştiği ve bozunmaların yaklaşık 320°C’de başladığı görülmektedir. Reçine ve katkı elemanı kimyasal olarak birbirine bağlanma göstermediklerinden bozunma karakterleri termal olarak değişkenlik göstermemiştir.



Şekil 5.4. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri



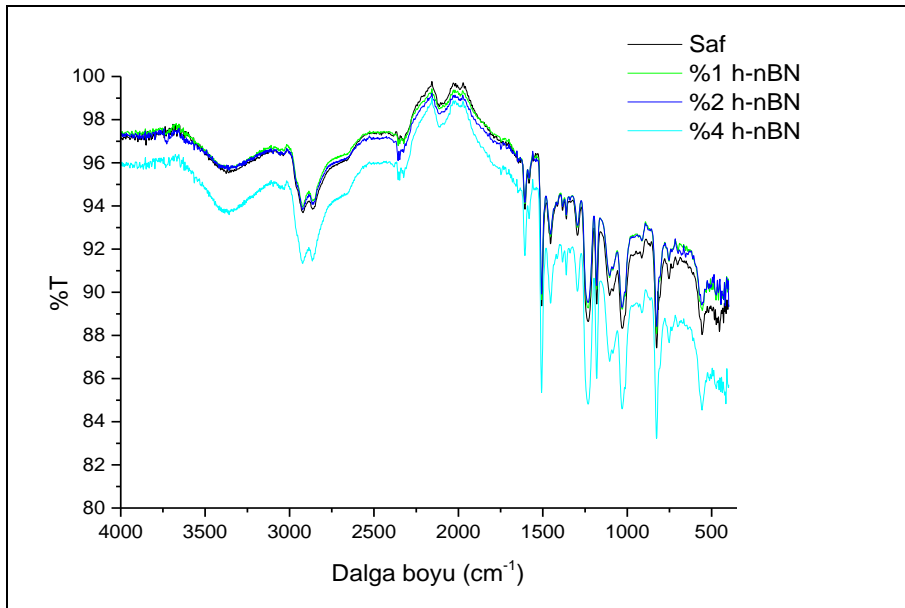
Şekil 5.5. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri



Şekil 5.6. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların TGA grafikleri

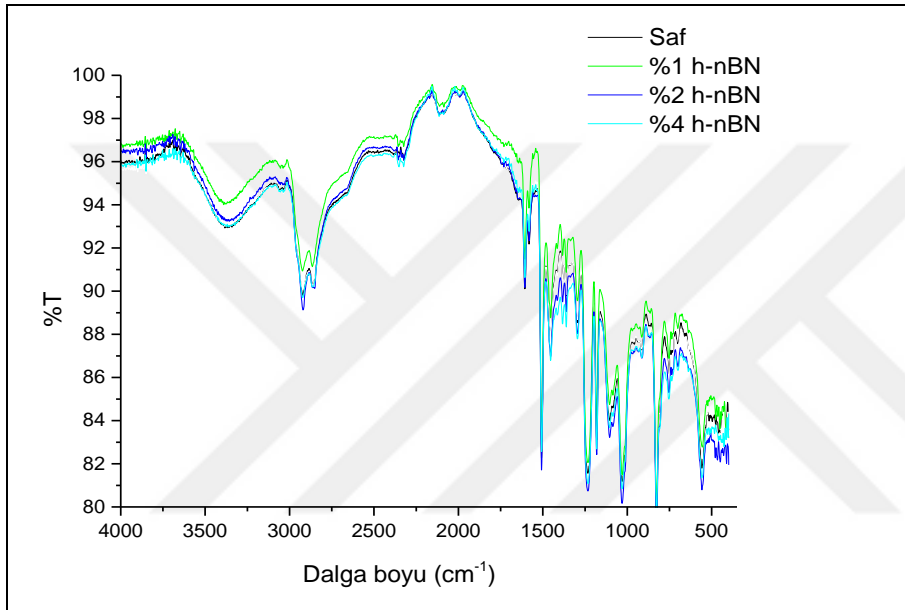
### 5.1.3. FTIR analizleri

FTIR spektrumları, belirli atom grupları arasındaki belirli bağların karakteristik titreşimlerini yansıtır ve organik gruplar gibi spesifik maddeleri tanımlamak için yaygın olarak kullanılır.



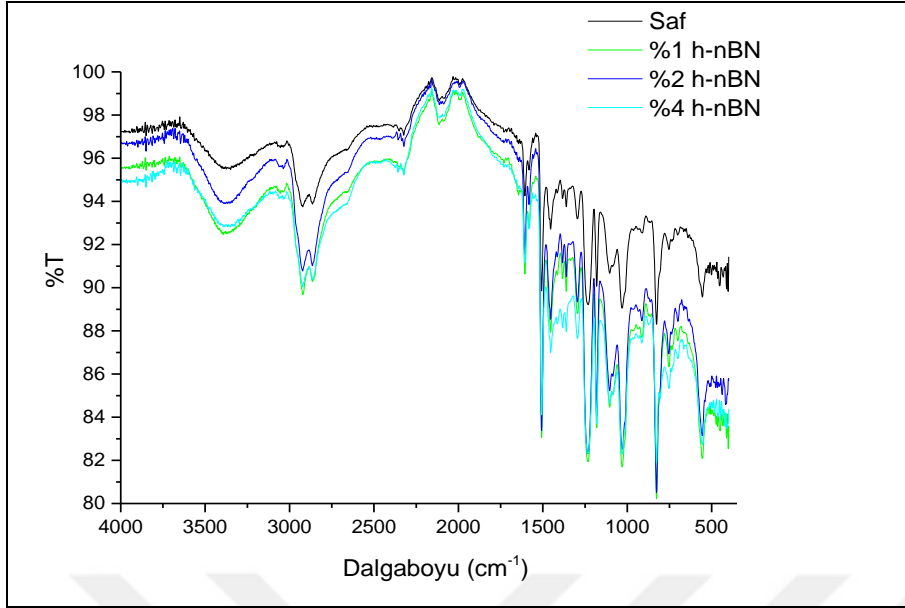
Şekil 5.7. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri

Elde edilen spektrumlar, birçok farklı bileşen içeren numunelerin kolayca taranabilmesini sağlayan moleküler parmak izleri içerir. Fonksiyonel grupları tespit etmek ve kovalent bağlanma bilgilerini karakterize etmek için kullanılan etkili bir analitik araçtır (Kayatekin, 2006). FTIR analizi, epoksi reçinesine h-nBN ilavesiyle meydana gelen değişiklikleri ve bor nitrür yapısının epoksi ile etkileşimi sırasında meydana gelen reaksiyonları açıklar. Kompozit plakaların FTIR spektrumları oda sıcaklığında,  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  aralığında elde edilmiştir.



Şekil 5.8. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri

Sonuçlar incelendiğinde her bir malzeme grubunda, %4 h-nBN katkılı plakaların daha derin pikler verdiği görülmüştür. Epoksi reçine h-nBN ile modifiye edildiğinde gözlenen titreşim bantları, moleküller arası etkileşimin bir sonucu olarak daha yüksek frekanslara kaymıştır. FTIR spektrumunda ortaya çıkan titreşim bantlarında saf kompozit numunelerine kıyasla ciddi bir bant kayması olmadığı tespit edilmiştir. h-nBN katkılı kompozitlerde daha yüksek frekanslarda tespit edilen zirveler, h-nBN'nin bir katalizör etkisi yaratarak atomlar arası etkileşimi arttırdığının ve çapraz bağlanma reaksiyonunu güçlendirdiğinin kanıtıdır.



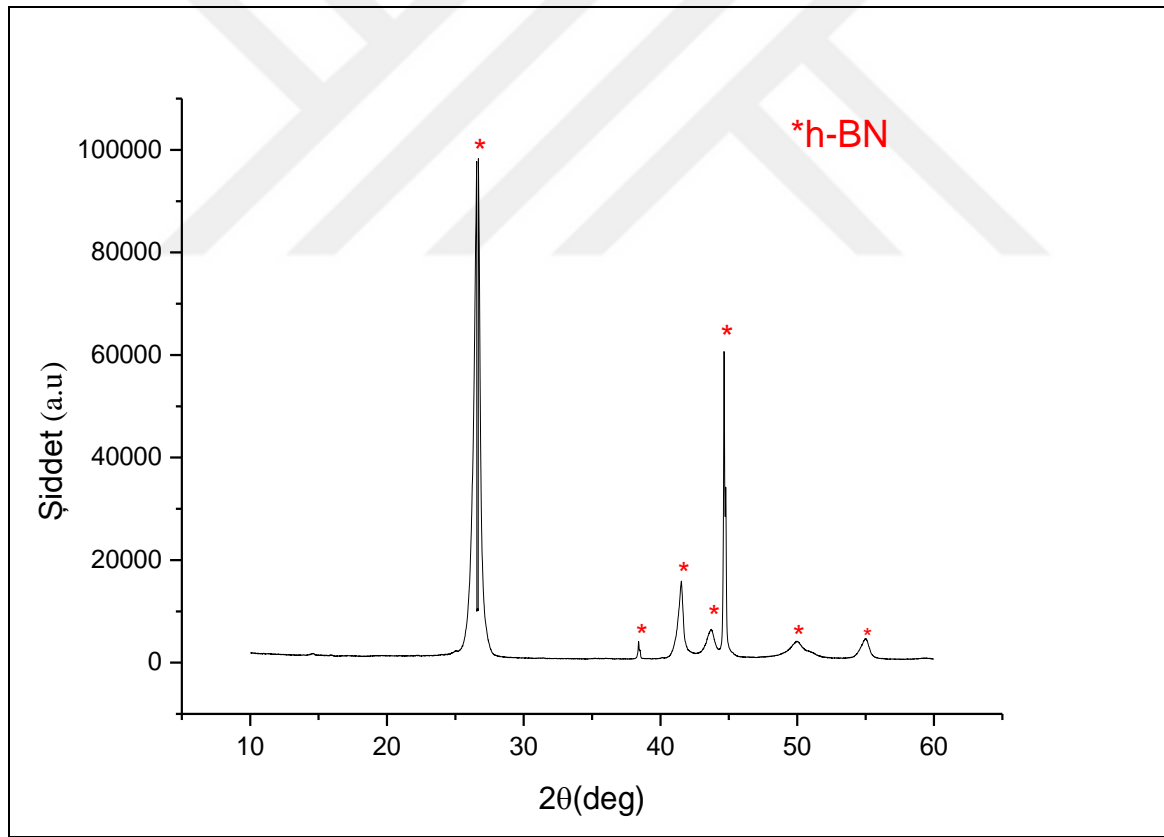
Şekil 5.9. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların FTIR grafikleri

Bor nitrür nano tozları, sırasıyla yaklaşık  $1390\text{ cm}^{-1}$  ve  $800\text{ cm}^{-1}$ 'de bulunan düzlem içi aksenal B-N-B titreşimi ve düzlem dışı B-N titreşimi olmak üzere iki karakteristik titreşim modu sergiler ve bu pikler keskin olmayıp yayvan bir biçime sahiptir (Konstantinou, Patsidis ve Psarras, 2020). Bu nedenle bor nitrüre karşılık gelen bantların, epoksi reçinesindeki fonksiyonel grupların bantlarıyla çakışması nedeniyle yeni bir bant oluşumu gözlemlenmemiştir (Ulus ve diğerleri, 2014).  $3400\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$  aralığında oluşan pikler moleküller arasında oluşan hidrojen bağlarının (O-H) karakteristik pikleridir.  $2900\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$  aralığında gözlenen pikler C-H,  $\text{CH}_2$  bağları ve simetriklerini temsil etmektedir.  $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  aralığı aromatik C-C titreşimlerine,  $1294\text{ cm}^{-1}$  asimetrik  $-\text{CH}_2$  deformasyonuna karşılık gelmektedir.  $1230\text{ cm}^{-1}$ , asimetrik aromatik C-O gerilmesine,  $1181,19\text{ cm}^{-1}$ , asimetrik alifatik C-O gerilmesine,  $1030,77\text{ cm}^{-1}$ , simetrik aromatik C-O gerilmesine karşılık gelir.  $914,093\text{ cm}^{-1}$  (karakteristik tepe) ve  $862,3\text{ cm}^{-1}$ , epoksi halka titreşimlerini temsil etmektedir.  $826,348\text{ cm}^{-1}$ , aromatik düzlemde  $-\text{CH}$  deformasyonuna,  $460\text{-}580\text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_4\text{X}_2$  (X: herhangi bir fonksiyonel grup) frekans özelliklerine karşılık gelir. (Maity Kasisomayajula, Parameswaran, Basu ve Gupta, 2008).

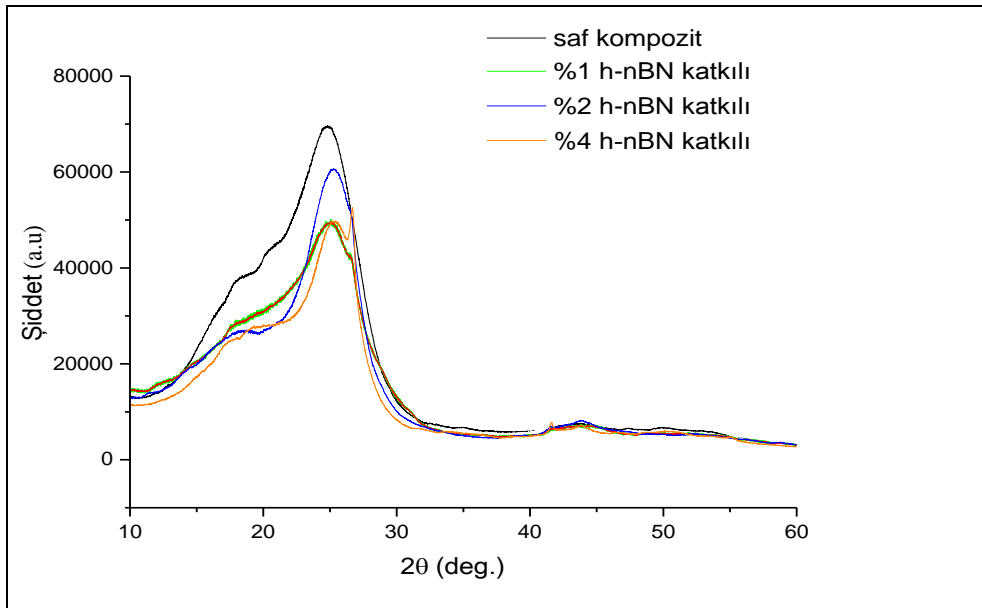
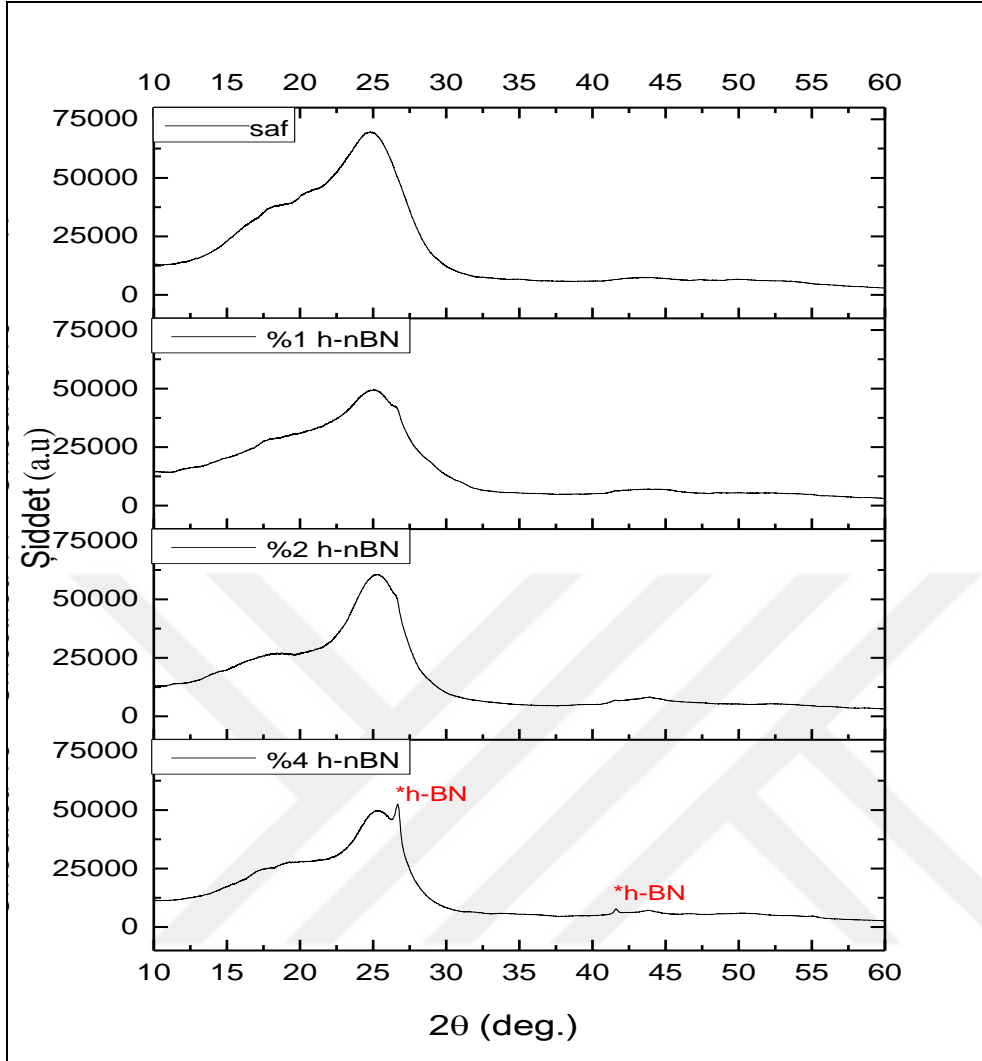
#### 5.1.4. XRD analizleri

h-nBN katkılı materyallerin XRD sonuçlarını karşılaştırmalı olarak tartışmak için literatürden elde edilen bilgiler ayrıntılı olarak incelenmiştir. XRD modellerine göre, elde

edilen numuneler, JCPDS kartı 34-0421'e karşılık gelen iki faz, epoksi ve h-nBN'den oluşmaktadır. Kullanılan katkı elamanı ve üretimi yapılmış plakaların XRD sonuçları Şekil 5.10-13'de verilmiştir. Difraksiyon pikleri epoksi faz yapısı baskın olduğu için yoğun ve keskin değildir. XRD modellerinde epoksi matrislerden gelen geniş, yayvan amorf yapının yanı sıra, zayıf karakteristik h-nBN (002), (100) ait pikler gözlenmiştir (Cui ve diğerleri, 2017). Yaklaşık  $26^\circ$  dolaylarındaki (002) düzlemine sahip hegzagonal bor nitrürün karakteristik piki kompozit plakalarda %4'lük oranda katkılandırma yapıldığında kısmen görülebilmektedir.  $26,8^\circ$  'de gösterilen tepe, bor nitrürün (002) kristal düzlemine karşılık gelir ve düzlemler arası mesafe Bragg denklemine:  $d = (\lambda/2 \sin\theta)$  (d-düzlemler arası mesafe,  $\lambda$ -dalga boyu,  $\theta$ -difraksiyon açısı) göre 3,32 nm olarak hesaplanır. Genel yapı itibariyle amorf olan kompozit plakaların, mevcut bor nitrür piklerini baskıladığı düşünülmektedir. Ayrıca %1 ve 2'lik bir katkının XRD ile tespitinin güç olduğu kanısına varılmıştır.

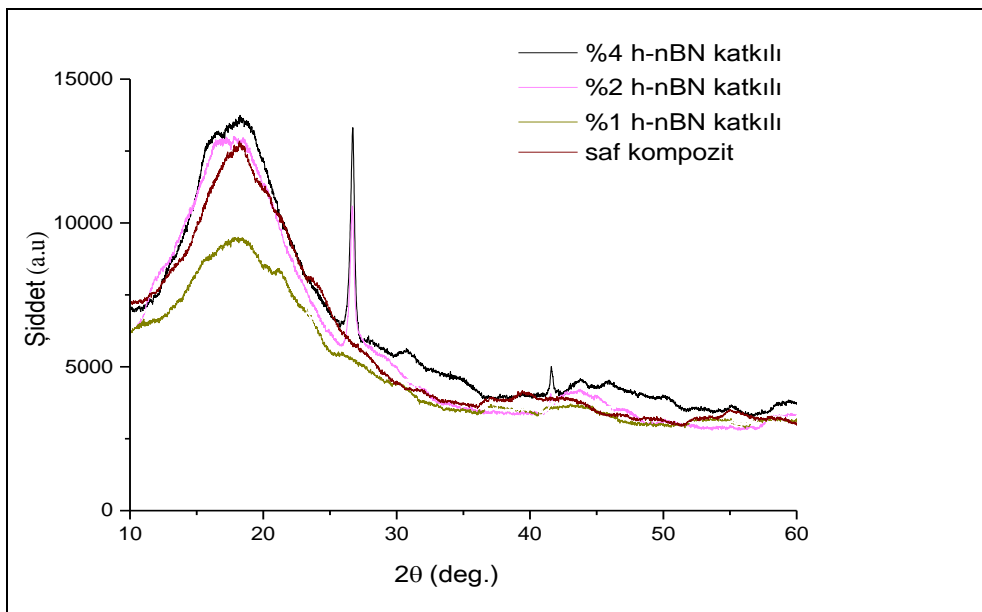
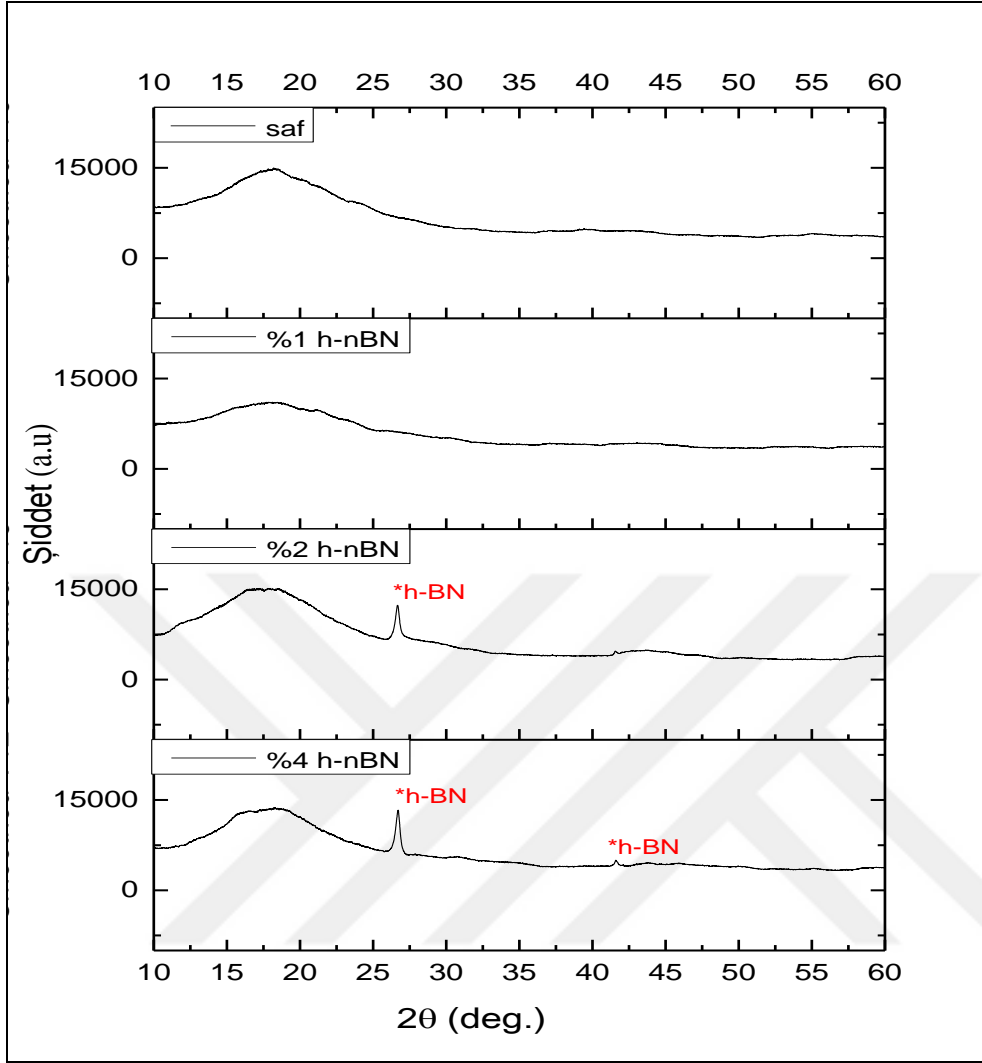


Şekil 5.10. Hegzagonal bor nitrür tozunun XRD grafiği

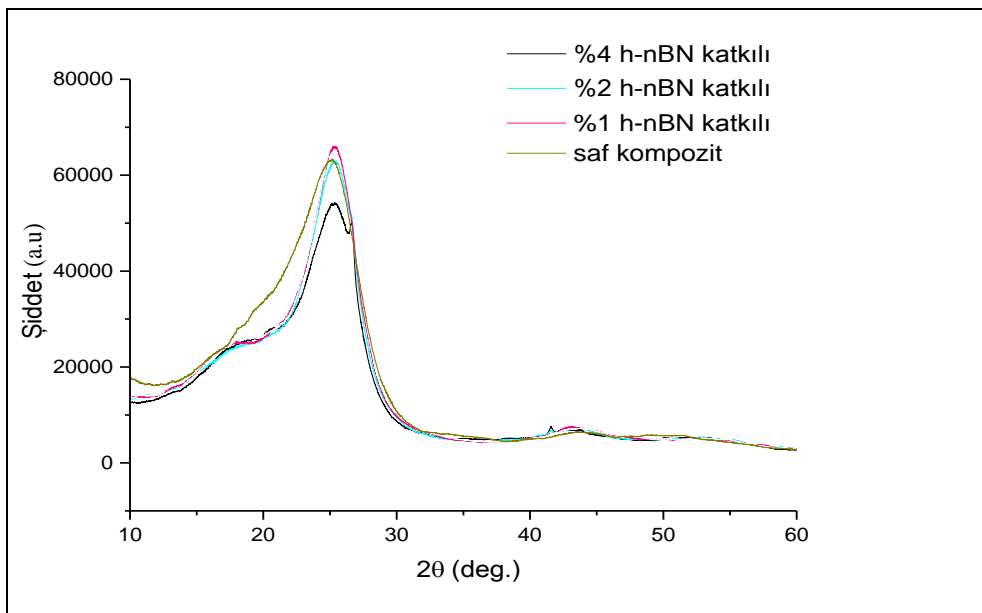
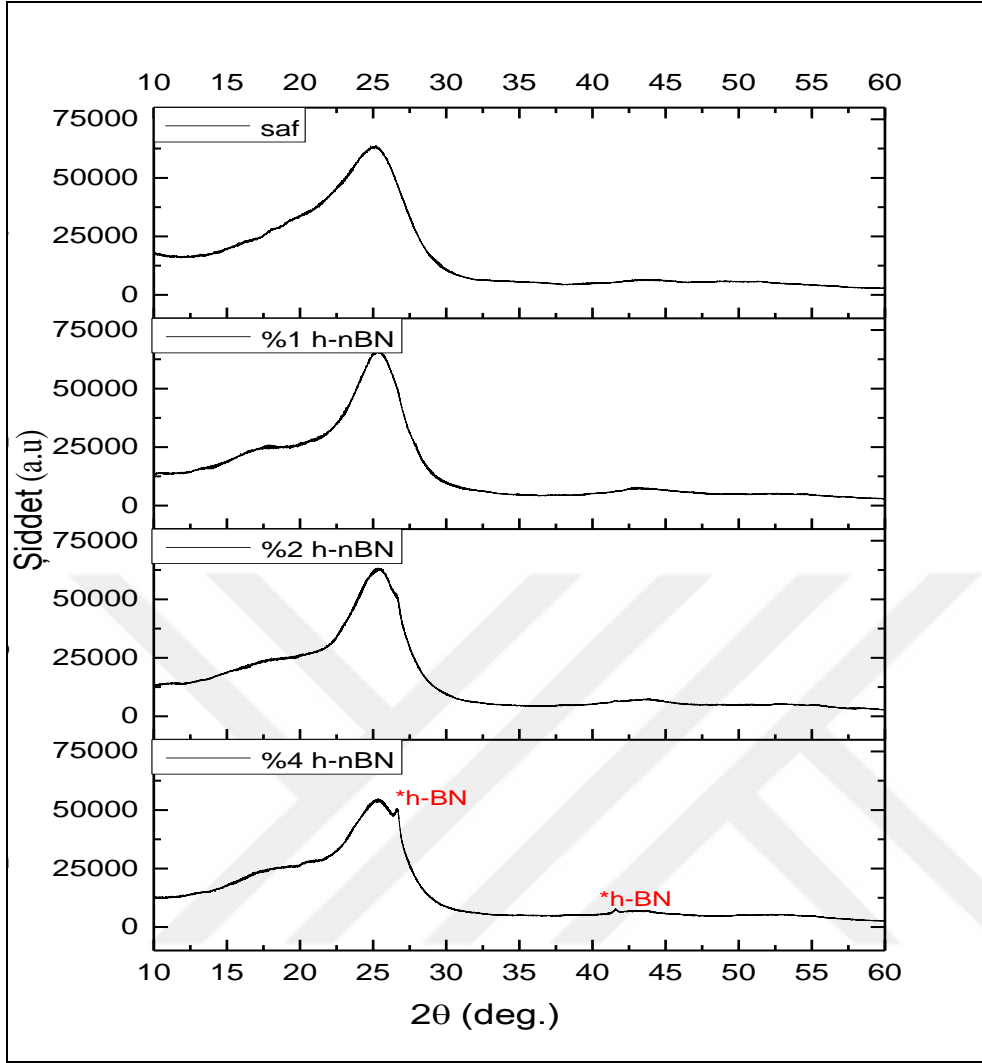


Şekil 5.11. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri





Şekil 5.12. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri



Şekil 5.13. 3 kat karbon+6 kat bazalt+3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların XRD grafikleri

### 5.1.5. SEM- EDS haritalama analizleri

Resim 5.2-4’de üretilmiş kompozitlerin farklı bölgelerinden alınan kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca nanopartiküllerin epoksi matrislerindeki dağılımı anlamak için her bir kompozit grubuna EDS mapping analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan h-BN’nin teknik özellikleri Çizelge 5.1’de, kimyasal bileşimi Çizelge 5.2’de ve SEM görüntüsü ise Resim 5.1’de verilmiştir.

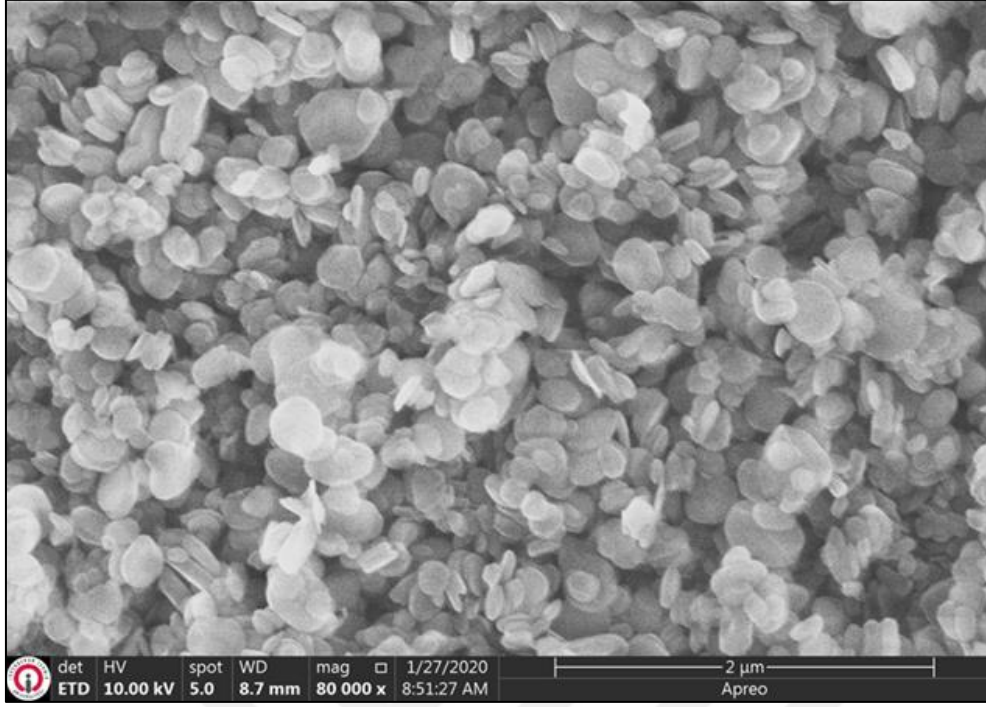
Çizelge 5.1. Katkı elemanının özellikleri

Malzeme	Özellikleri
Hegzagonal bor nitrür	Ortalama tane boyutu: <150 nm, Saflık: % 99,97 Renk: Beyaz, Özgül yüzey alanı 20 m <sup>2</sup> /g, Yoğunluk: 2,30 g/cm <sup>3</sup>

Çizelge 5.2. Bor nitrürün kimyasal bileşimi

Kimyasal sembol	BN
Azot	%56,45
Bor	%43,58
Yoğunluk	2,29 g/cm <sup>3</sup>
Erime noktası	2,527°C

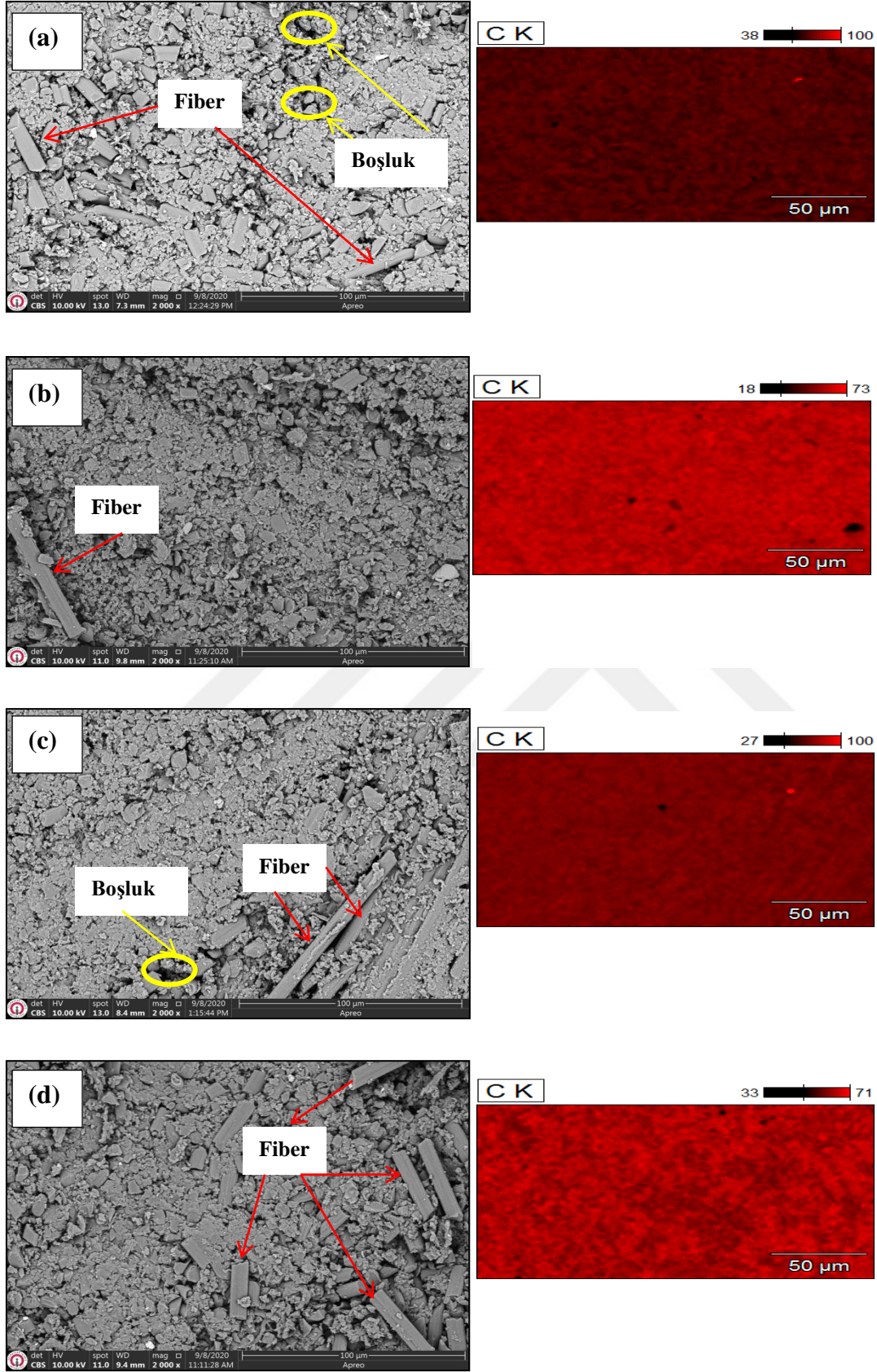
Resim 5.1’de üst üste binmiş eş eksenli homojen dağılımlı altıgen levhalar şeklinde çok sayıda hegzagonal yapıya sahip bor nitrürlerin yer aldığı görülmektedir. Boyut olarak değişkenlik gösteren levhaların birbiri üzerine tabakalı olarak bağlandığı ve oluşan her bir BN tabakasının birden çok BN nano taneden oluştuğu açıkça görülmektedir.



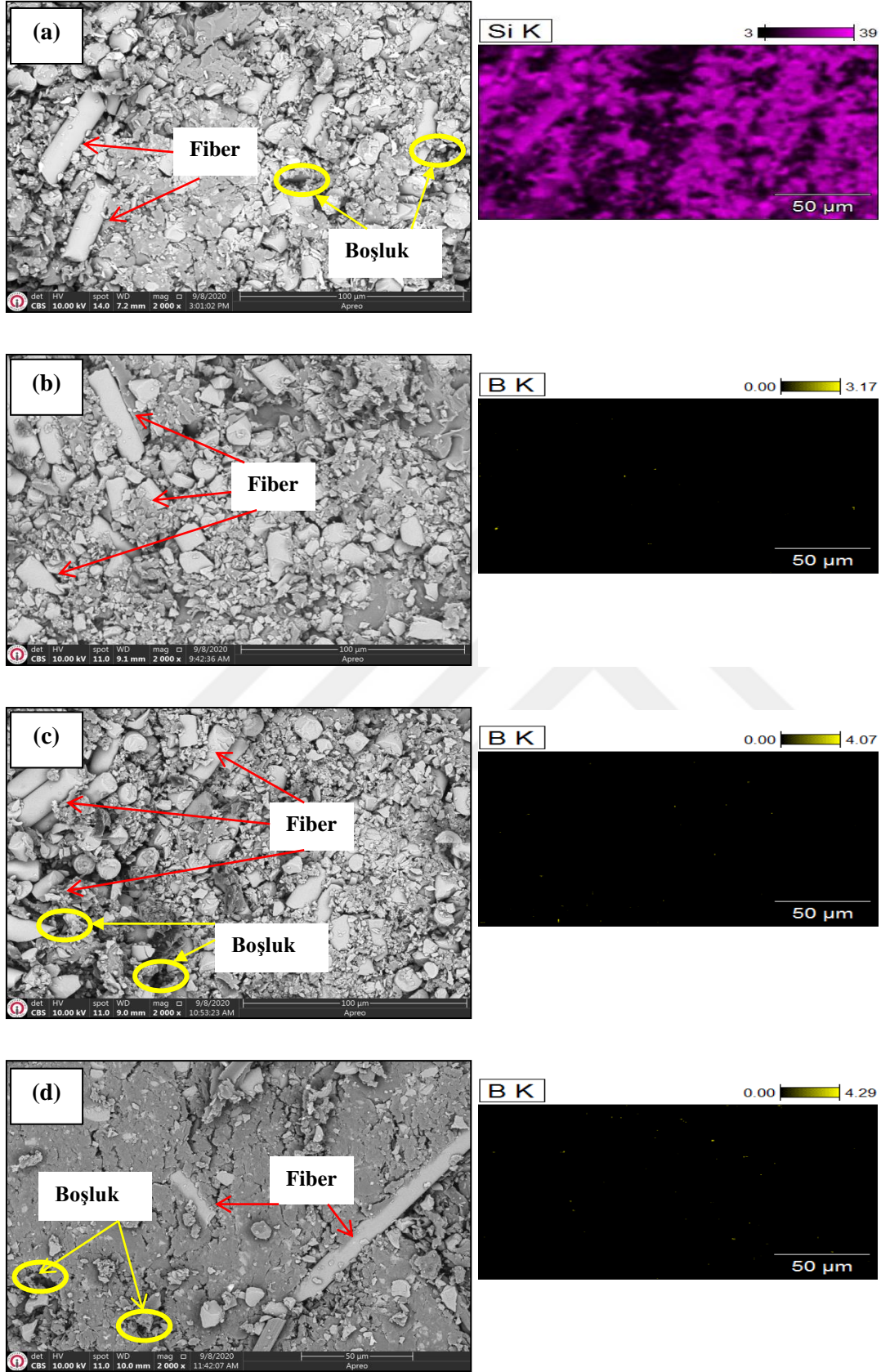
Resim 5.1. h-nBN'nin SEM görüntüsü

Tüm mikrograflarda görüldüğü gibi matris malzemesi olan epoksi reçine, fiberleri tamamen sarıp ıslatmıştır. Elde edilen SEM görüntülerinde kuru bölgeye rastlanılmaması üretim yönteminin verimliliğinin bir ispatı olmaktadır. Ancak bazı bölgelerde çekme mukavemetinde de bir azalmaya neden olan boşluklar vardır. Şekillerde fiber katmanları açıkça görülmektedir ve nanopartiküller tüm matris boyunca genel olarak homojen dağılırken belli bölgelerde kısmi aglomerasyonlar tespit edilmiştir. % 1'lik h-nBN katkılı üretimlerde birim alana oldukça az miktarda takviye malzemesi düşmesi nedeni ile bor nitrür tabakalar epoksi matris içine zaman zaman gömülmemekte hatta gözlemlenememektedir. Takviye elemanı yüzdesi arttıkça birim alana daha fazla h-nBN düşmüş ve böylece takviye elemanı daha belirgin gözlemlenmiştir. Ayrıca, mekanik özellikler üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilecek boşlukların varlığında SEM analizi ile tespit edilmiştir.

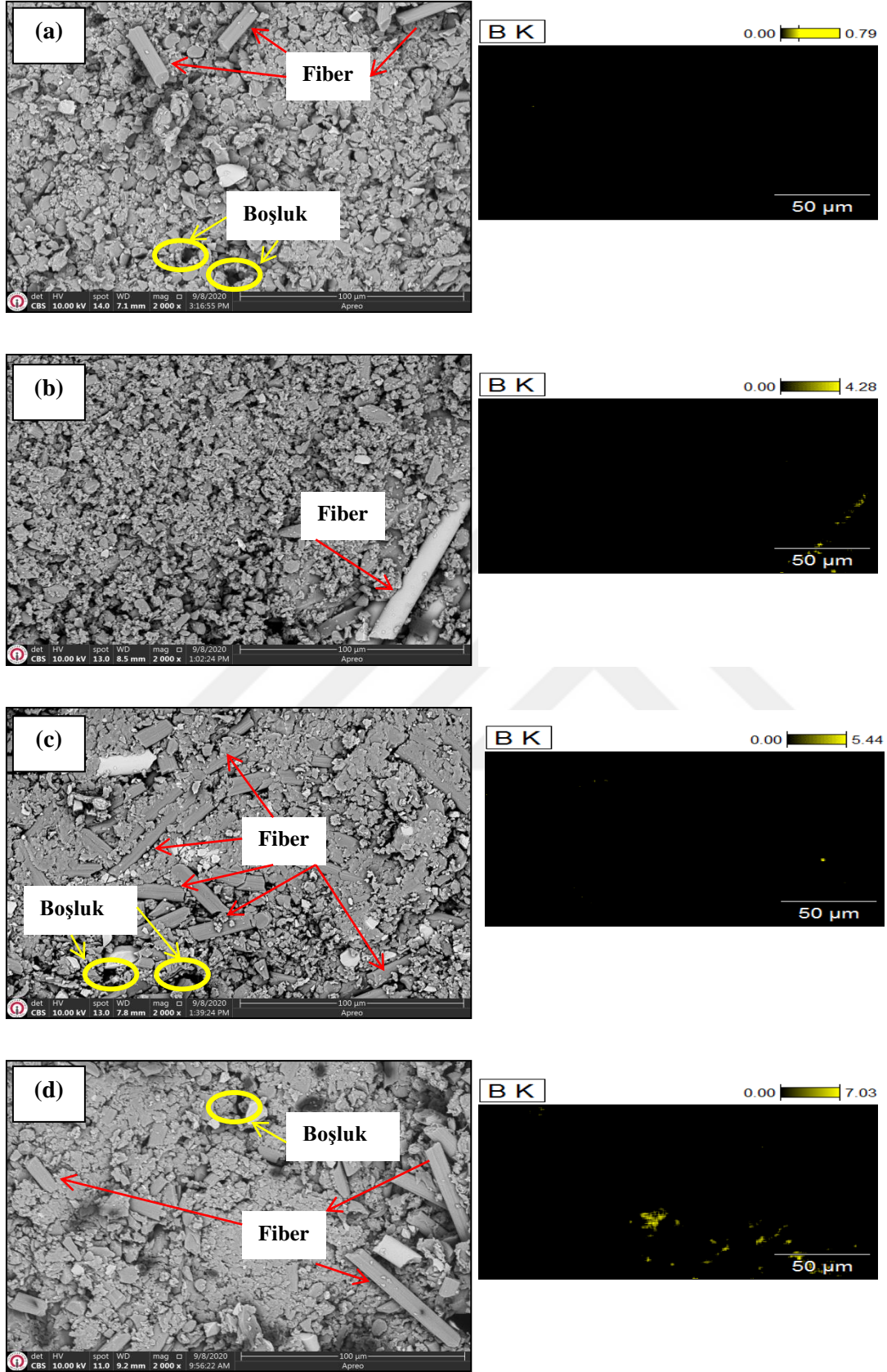
Haritalama, EDS incelemesi yapılan bölgedeki elementlerin yoğunluklarına göre renk kartelâsı üzerinden yapılan bir elementsel analiz çeşididir. Nokta veya seçili bir bölge yerine tüm resmin analiz edildiği haritalamada periyodik cetveldeki tüm elementler taranmakta ve renklendirme ile görselleştirilmektedir.



Resim 5.2. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı



Resim 5.3. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı



Resim 5.4. 3 kat karbon+6 kat bazalt +3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların SEM ve EDS-mapping sonuçları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı

Karbon kumaş ile yapılmış üretimlerde hem takviye elemanından hem reçineden yüksek oranda karbon geldiği için EDS haritalama sonuçlarında baskın yapı karbon olarak görülmüştür. Bazalt kumaşlı üretimlerde h-nBN'lerin genel olarak homojen şekilde dağıldığı hibrit kompozitlerde ise yer yer kısmi aglomerasyonların olduğu açıkça görülmektedir.

## 5.2. Mekanik Test Sonuçları

### 5.2.1. Tahribatsız muayeneler

#### *Ağırlık ölçümü*

Kompozit plakaların üretimden önce kuru ağırlıkları ve üretim sonrası ağırlıkları ölçülerek ağırlıkça fiber-matris oranları tespit edilmiştir. Çizelge 5.3'de ağırlıkça fiber ve emilen reçine oranları verilmektedir. Her plakada elyaf boyutları, katman sayısı aynı olsa da elyafın iç yüzeylerinde tutunan reçine miktarının (%) farklı olduğu görülmektedir. Bu farkın elle yatırma ile üretim esnasında kumaşlara emdirilen reçine miktarının farklılığından bu nedenle aynı vakum şartlarında olmasına rağmen sistemde daha çok reçine kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### *Kalınlık ölçümü*

Çizelge 5.4'de kompozit levhaların çeşitli bölgelerinden yapılan kalınlık ölçümlerinin ortalama değerleri verilmektedir. Ölçülen değerler birbirine oldukça yakın çıkmaktadır, ölçülen en büyük fark milimetrenin 4/10'u kadardır. Sonuçlarda dikkati çeken en önemli nokta en yüksek katkı oranlarında numune kalınlığının çok küçük oranlarda arttığına tespitidir. Buradan partikül yoğunluğunun arttığı reçine karışımlarının yüzeyde daha çok toplandığı sonucu çıkarılmaktadır. İyapıya nüfuz etmekte zorlandığı düşünülen nano partikül takviyeli reçine karışımlarının kısmi filtrasyon yaşadığı düşünülmektedir.

#### *Yoğunluk ölçümü*

Çizelge 5.5'de, Eş. 4.1 kullanılarak kompozitlerin teorik yoğunluğu ( $T_y$ ),  $g/cm^3$  olarak hesaplanmıştır.



Çizelge 5.3. Kompozitlerin ağırlık ölçüm sonuçları

<b>Malzeme</b>	<b>Ağırlıkça fiber (%)</b>	<b>Ağırlıkça emilen reçine (%)</b>
Saf (bazalt kumaş)	62,7	37,29
%1 h-nBN katkıli +bazalt kumaş	67,76	32,23
%2 h-nBN katkıli +bazalt kumaş	64,55	35,44
%4 h-nBN katkıli +bazalt kumaş	65,21	34,78
Saf (karbon kumaş)	64,57	34,51
%1 h-nBN katkıli+karbon kumaş	65,15	34,84
%2 h-nBN katkıli+karbon kumaş	59,63	40,36
%4 h-nBN katkıli+karbon kumaş	58,36	41,63
Saf (Hibrit)	70,65	29,34
%1 h-nBN katkıli+hibrit	66,82	33,17
%2 h-nBN katkıli+hibrit	65,08	35
%4 h-nBN katkıli+hibrit	60,36	39,63

Çizelge 5.4. Kompozitlerin kalınlık ölçüm sonuçları

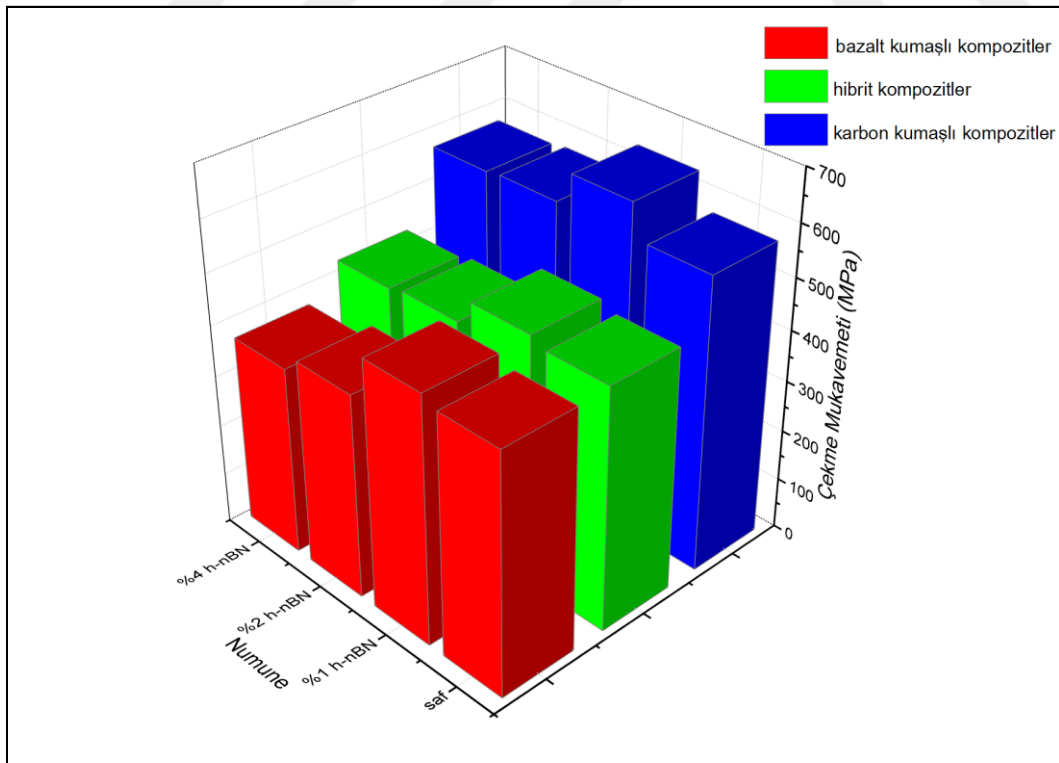
<b>Kumaş türü</b>	<b>Saf ortalama kalınlık (mm)</b>	<b>%1 h-nBN katkıli ortalama kalınlık (mm)</b>	<b>%2 h-nBN katkıli ortalama kalınlık (mm)</b>	<b>%4 h-nBN katkıli ortalama kalınlık (mm)</b>
Bazalt	2,28	2,2	2,32	2,35
Karbon	2,7	2,6	3	3,05
Hibrit	2,2	2,6	2,4	2,8

Çizelge 5.5. Kompozitlerin teorik yoğunluk değerleri

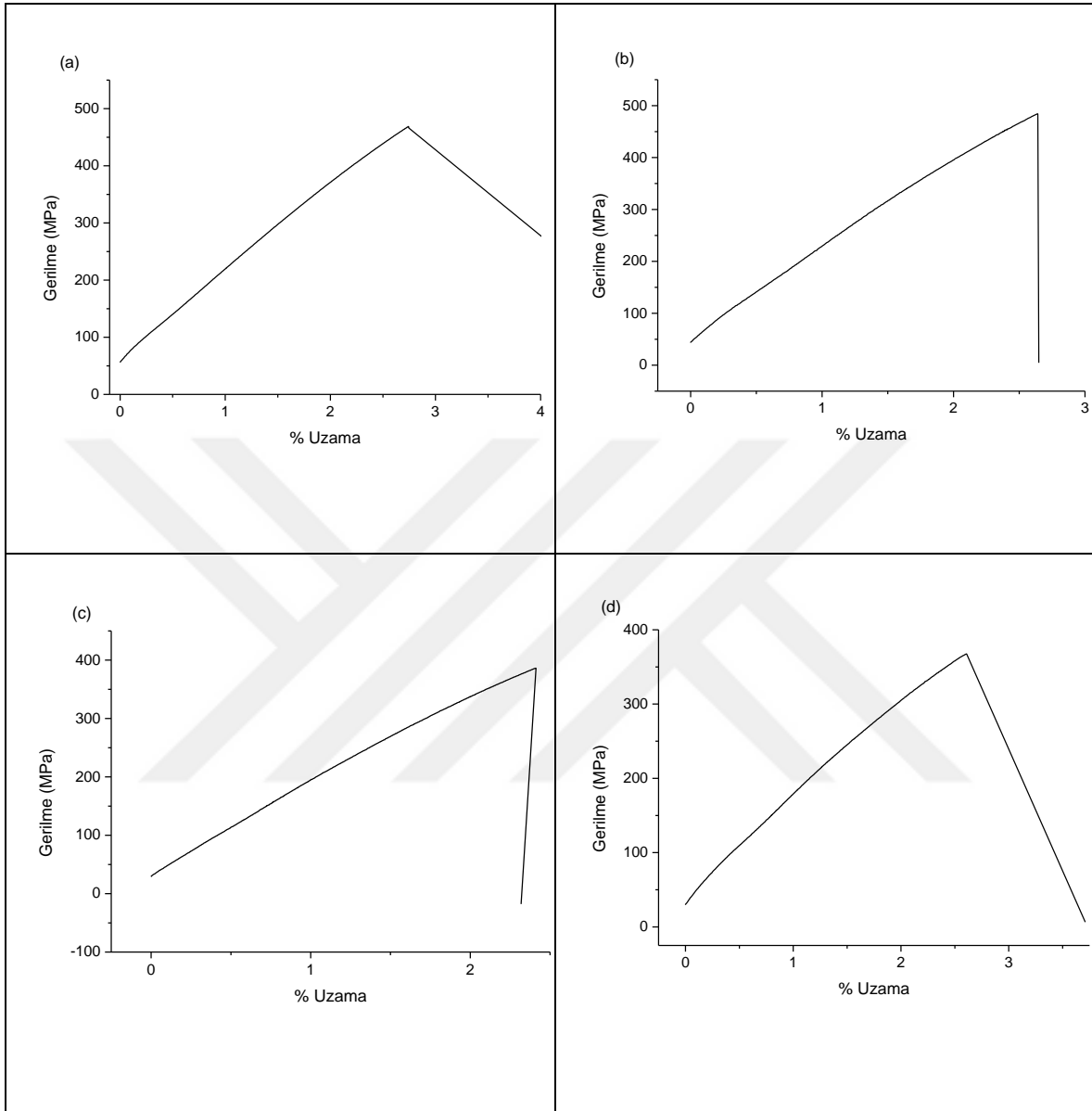
Kumaş türü	Saf teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%1 h-nBN katkılı teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%2 h-nBN katkılı teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%4 h-nBN katkılı teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Bazalt	1,78	1,86	1,81	1,82
Karbon	1,506	1,503	1,46	1,45
Hibrit	1,74	1,69	1,67	1,62

### 5.2.2. Çekme testi

Saf ve h-nBN katkılı kompozitlerin çekme testleri ASTM D3039 standardına göre 2 mm/dak hızda Shimadzu Üniversal test makinesi kullanılarak yapılmıştır. Düşük hızda test yapılmasının nedeni termosetlerin kırılğan yapıda olmasıdır. Her bir plaka için beş numune çekme testine tabi tutulmuş ve numuneye uygulanan yük  $P$  ve deplasman  $\delta$  değerleri anında rapor edilip numunelerin ortalama gerilme mukavemeti tespit edilmiştir. Her bir plakadan üretilen 5'er adet numunelerin mukavemet ortalaması alınmış ve sonuçlar Şekil 5.14'de görüldüğü gibi çizdirilmiştir.



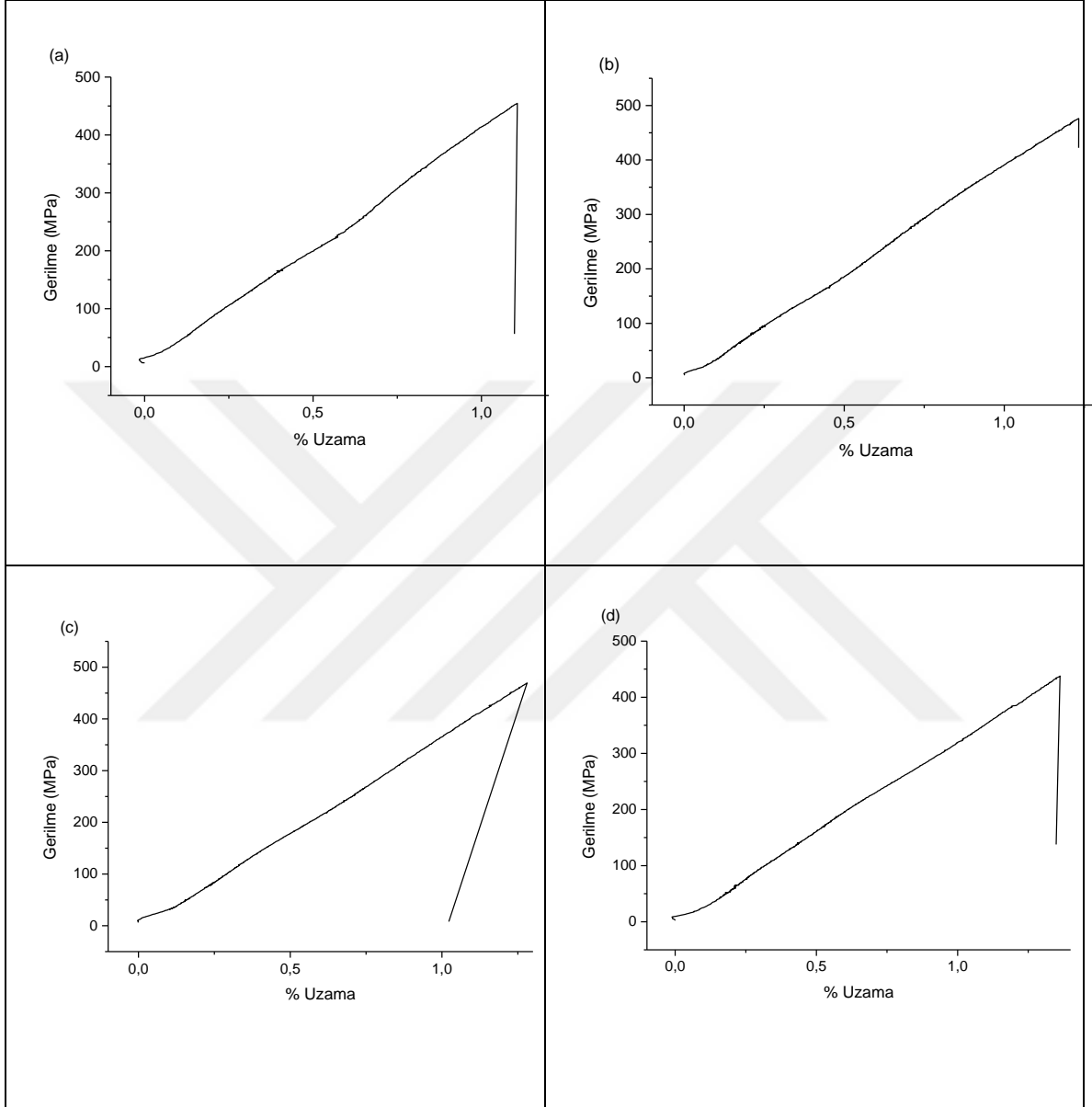
Şekil 5.14. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin çekme mukavemeti diyagramları



Şekil 5.15. 12 kat bazalt kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkı, (c) %2 h-nBN katkı, (d) %4 h-nBN katkı kullanılarak hazırlanmış kompozitlerin  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramları

Sonuçlar incelenecek olursa karbon, bazalt ve karbon+bazalt kumaş takviyeli üretimlerde %1 h-nBN katkıli kompozitlerde en yüksek mukavemet değeri elde edilmiştir. Bazalt kumaşlı ve %1 h-nBN katkıli plakanın çekme mukavemeti 484,2 MPa olurken minimum çekme mukavemeti değeri ise %4 oranında katkılandırma ile tespit edilmiş ve 370 MPa olarak bulunmuştur. Ortalama standart sapma değeri %9.24'dür. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum ve minimum çekme değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler 488,1 MPa ve 638,16 MPa, minimum değerler ise

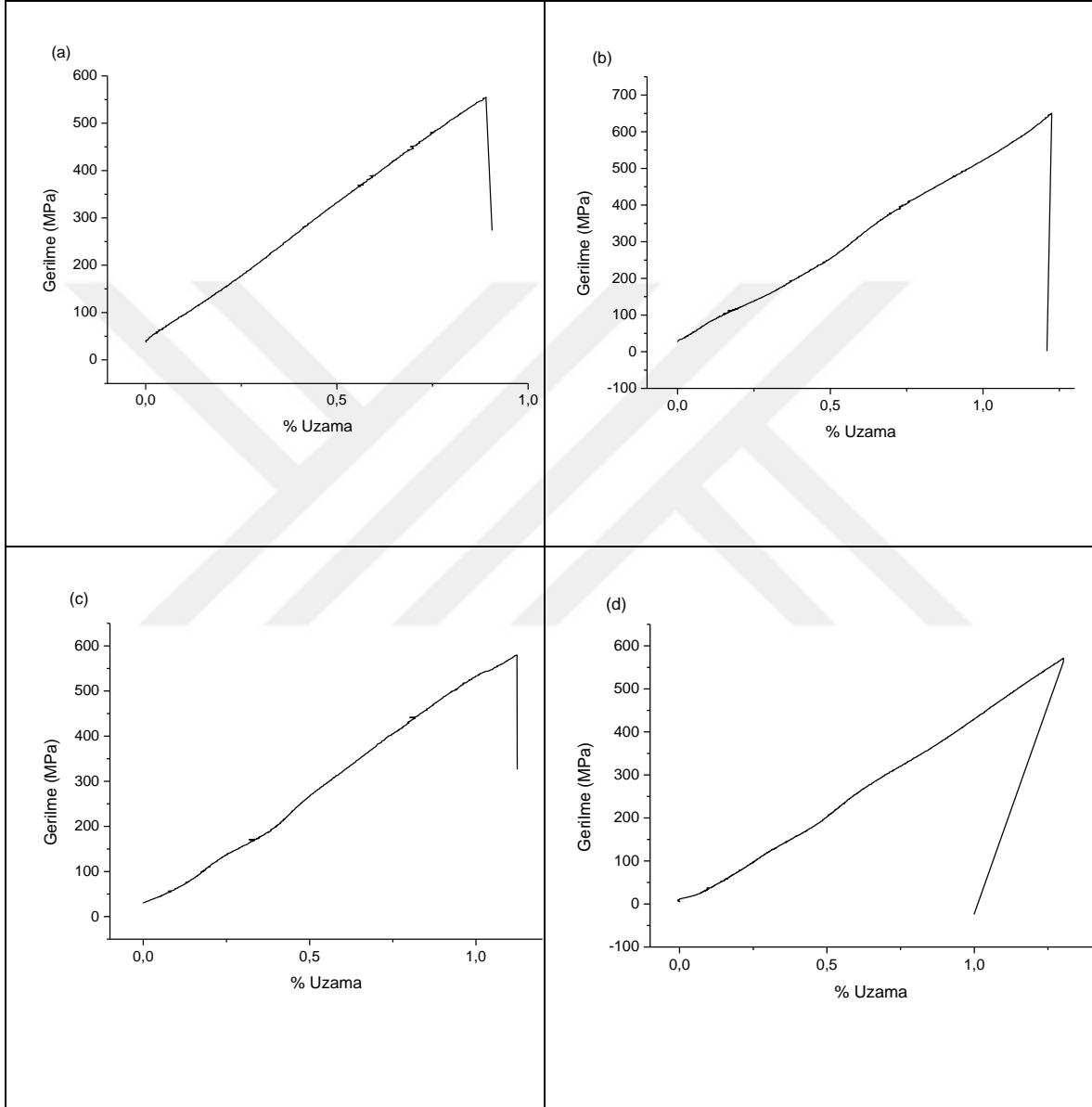
430,1 MPa ve 570,43 MPa olarak rapor edilmiştir. Hibrit kompozitlerde ortalama standart sapma değeri %15.64 karbon plakalarda ise %14,44'dür.



Şekil 5.16. 3 kat bazalt+6 kat karbon+3 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramları (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı

Hegzagonal nano bor nitrür belirli bir katkı oranına kadar fiber ve epoksi arasındaki arayüzey bağımlı güçlendirmiştir. Bununla birlikte, nanopartiküllerin zayıf dağılımı sonucu çekme mukavemetinin artan h-nBN ilavesiyle azaldığı tespit edilmiştir. Bu zayıf dağılım, aglomera oluşumuna katkıda bulunur ve gerilme konsantrasyon bölgelerinin oluşumunun bir sonucu olarak gerilme mukavemetinde bir azalma gözlenir (Bulut, 2017). Yukarıdaki

incelemeler açıkça ortaya koymaktadır ki, h-nBN katkısı kompozit malzemenin karakteristik çekme davranışını değiştirmiştir. h-nBN epoksi matris içerisine belirli oranlarda katıldığında hem kopma dayanımının hem de şekil değiştirme miktarının artmasını sağlayarak tabakalı kompozit malzemenin rijitliğini ve tokluğunu artmıştır.



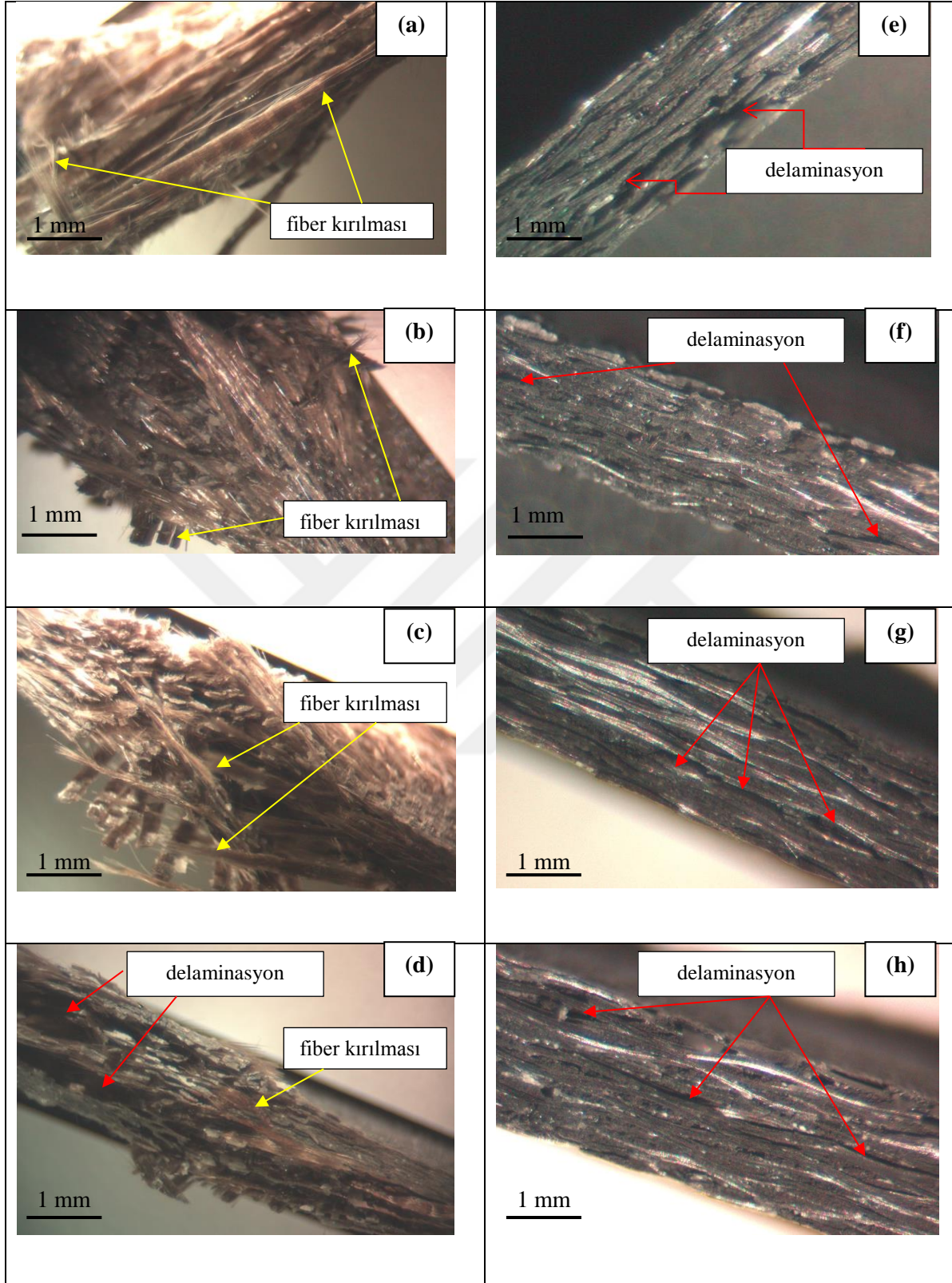
Şekil 5.17. 12 kat karbon kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı kullanılarak hazırlanmış kompozitlerin  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramları

Şekil 5.15-17'de tüm kompozit plakalara ait  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramları verilmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi %1 h-nBN içeren numunelerin kopma noktasındaki çekme gerilmesi saf epoksili plakalardan daha yüksek bulunmuştur. Artan hegzagonal nano bor nitrür oranıyla

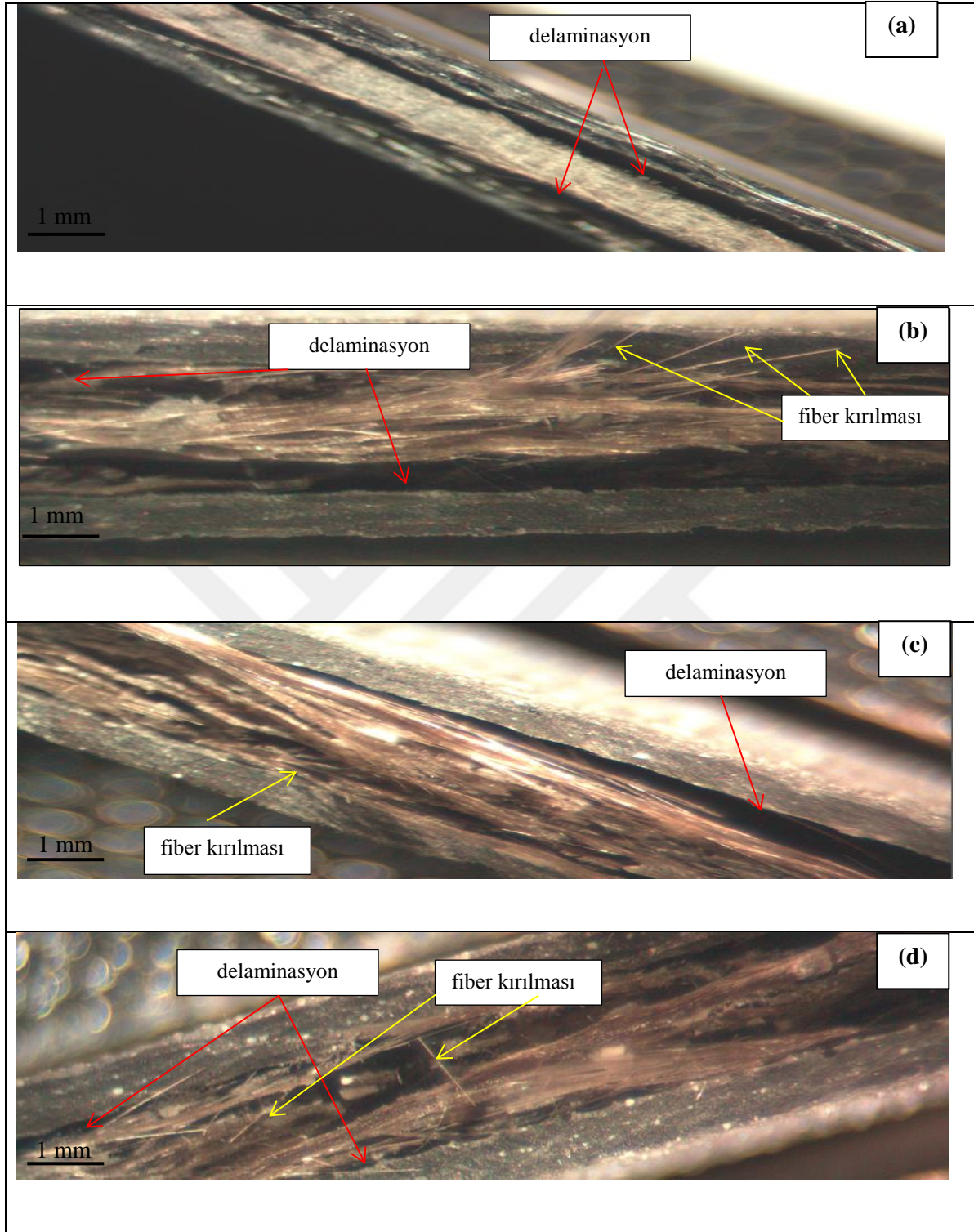
daha düşük gerilim değerleri, daha yüksek % uzama değerleri elde edilmiştir. h-nBN katkısı, kompozit plakaların şekil değiştirme oranını arttırmıştır.

Malzemede hasarın başlangıcı bir kusurun varlığına atfedilir. Hava kabarcıkları, reçine bakımından zengin alanlar, boşluklar, yapı içerisindeki homojensizlikler, üretimden kaynaklı sorunlar bu kusurlar arasında sayılabilir. Birbirine bağlanarak daha büyük birimler oluşturan aglomeralar ve zayıf bağlanmış paręacıklar da kırılmaya neden olabilir. Stereo mikroskop görüntüleri, çekme testlerinden sonra numunelerin hasar mekanizmalarını sınıflandırmak için kompozit laminatların kırık kesit yüzeylerinden çekilmiştir. Resim 5.5-6 ekme örneklerin kırık yüzey morfolojisini içermektedir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde saf çekme numunelerinde daha gevrek bir kırılmanın gözlemlendiği tespit edilmiştir ve h-nBN'lerin epoksi matris içerisine katılması durumlarında kırılma yüzeylerinin morfolojisi değiştiği ve plastik deformasyon gösterdiği gözlenmiştir. Kompozit malzemelerde çeşitli hasar modları gözlenir. Bunlar, katmanlar arasındaki zayıf arayüzey yapışmasının neden olduğu matris atlması, lif kırılması ve delaminasyondur (Sun, Tong, Chen, Gong ve Li, 2018).

Hasar mekanizması, liflerin artan bir yük ile kırılması ve bunları epoksi matrisinden sıyırma biçimindedir. Karbon kumaş takviyeli kompozitlerde çekme sırasında yüzeylerin uzayarak kırılmış olduğu ve kırık yüzeyinde boşluklar ve ayrılmalar olduğu tespit edilmiştir. Yüzeydeki przllklerden malzemenin kayma hareketi ile bir miktar plastik deformasyon gösterdiği düşünülmektedir. Hibrit kompozitlerde, karbon ve bazalt liflerinin arayüzleri, bu farklı malzeme katmanları arasındaki daha yüksek uyumsuzluğa bağlı olarak belirgin bir delaminasyon göstermiştir (Bakal Gumus ve Yapıcı, 2020). Çatlağın bazalt lif tabakalarına girdiğinde bir şekilde tutuklandığı unutulmamalıdır. Sünek bazalt elyaf katları, çatlakların kalınlık boyunca daha fazla yayılmasını kesin olarak önlemiştir. Ayrıca, hegzagonal bor nitrürün genel olarak epoksi içine katkısı, kırılma kalıplarını değiştirmiş ve kırılma modlarını zenginleştirmiştir, gevrek kırılmadan daha sünek bir kırılmaya geçişe sebebiyet vermiştir. Çekme mukavemeti %1 h-nBN yükünde arttırılmış olsa da, epoksi içindeki h-nBN içeriğinin daha da artması, arayüzey bağının azalmasına neden olmuştur.



Resim 5.5. 12 kat bazalt kumaş (a) saf, (b) %1 h-nBN katkıli, (c) %2 h-nBN katkıli, (d) %4 h-nBN katkıli, 12 kat karbon kumaş (e) saf, (f) %1 h-nBN katkıli, (g) %2 h-nBN katkıli, (h) %4 h-nBN katkıli, kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar bölgelerinin stereo mikroskop görüntüleri

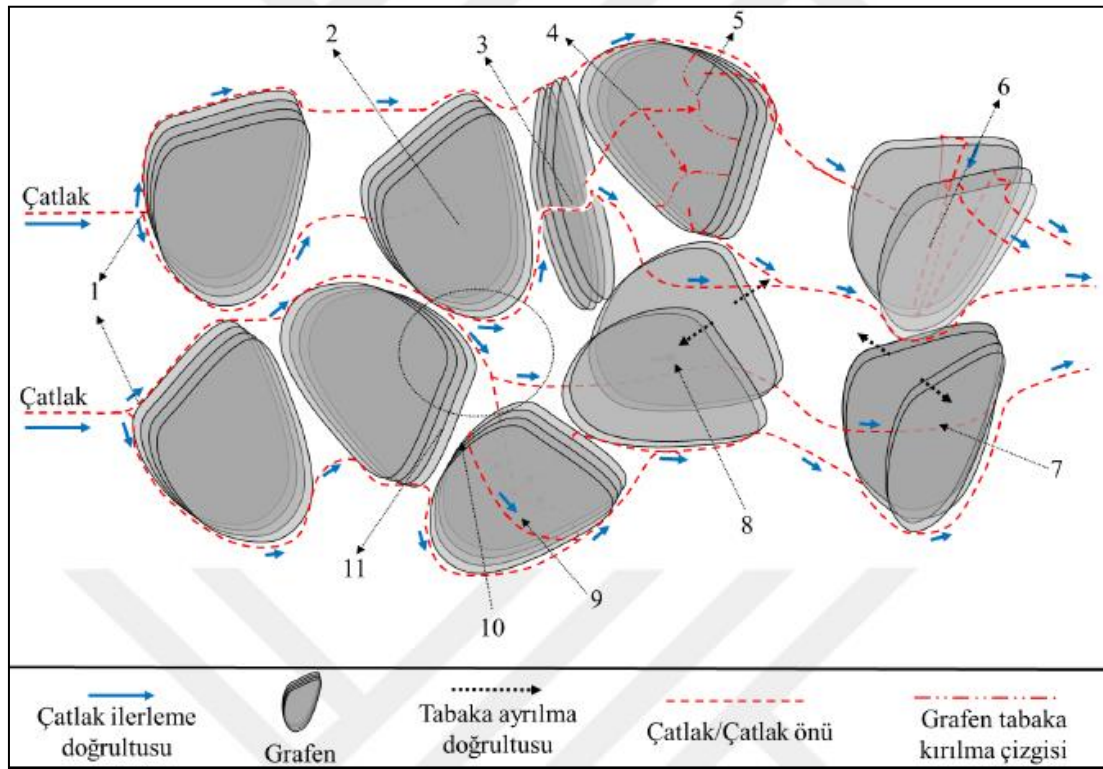


Resim 5.6. 3 kat bazalt+6 kat karbon+3 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar bölgelerinin stereo mikroskop görüntüleri (a) saf, (b) %1 h-nBN katkılı, (c) %2 h-nBN katkılı, (d) %4 h-nBN katkılı

Resim 5.7'de grafen takviyeli polimer matrisli kompozitte meydana gelen bir çatlakın grafen ile karşılaşmasında gerçekleşen etkileşimler görülmektedir. h-nBN katkısında da



aynı durumlar söz konusudur. Birinci durumdaki gibi çatlak h-nBN ile karşılaştığında iki kola ayrılıp yoluna devam edebilir ya da enerjisi azalan çatlak h-nBN tarafından durdurulabilir (2. durum). Resim 5.7-3'deki gibi yüksek enerjili çatlak h-nBN ile karşılaşırsa h-nBN tabakalarının hepsini kırarak ilerleyebilir ya da dördüncü durumdaki gibi takviye elemanı ile karşılaşan çatlak saparak ilerleyebilir. 5. durumda h-nBN'nin kısmi kırılması sonucu çatlak farklı yollardan ilerleyebilir. Bir sonraki durumda gösterildiği gibi çatlak h-BN tabakaları arasına penetre olarakta yoluna devam edebilir. Resim 5.7-7'de ki gibi çatlak h-nBN tabakalarının arasına girerek tabakaları birbirinden ayırabilir ya da çatlak, h-nBN tabakalarının arasından geçerek h-nBN tabakalarını tamamen ayırıp ilerlemesine devam eder. Bir diğer durumda çatlak, h-nBN'nin nano boyuttaki genişliği boyunca ya da kalınlığı boyunca ilerleyebilir. Son durumda ise ana çatlak, farklı konumlarda bulunan h-nBN'ler ile karşılaşır ise çatlak alt çatlaklara ayrılır ve çatlak dallanması meydana gelebilir.

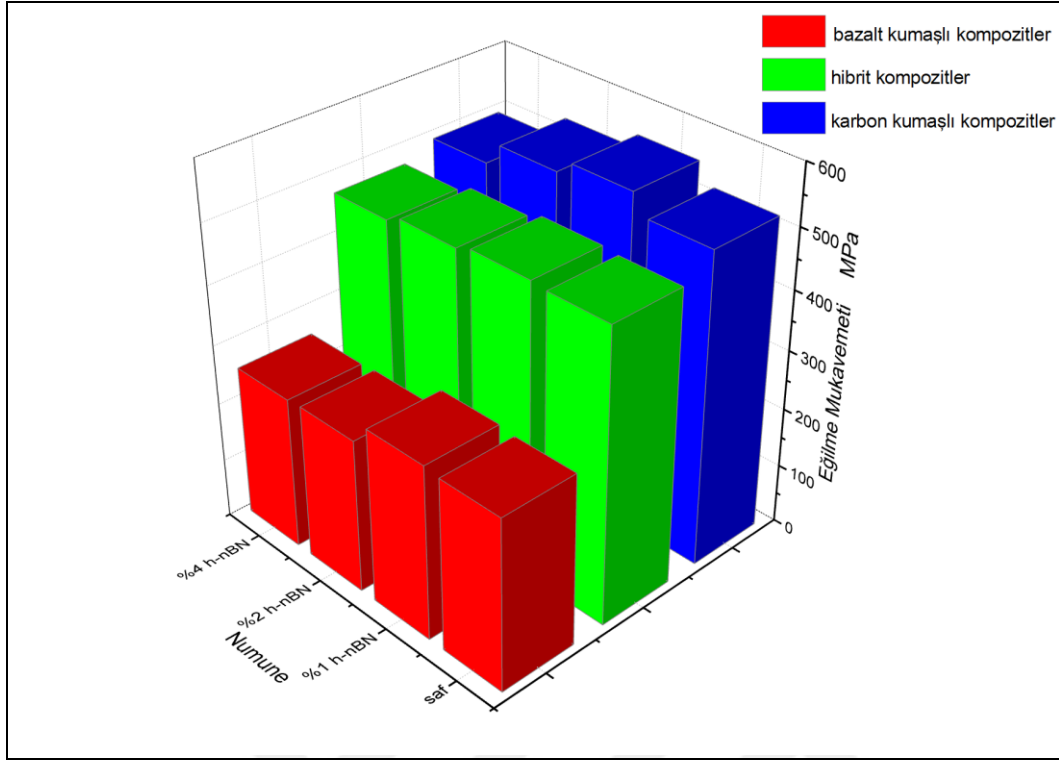


Resim 5.7. Epoksi matriste grafen/çatlak etkileşiminin şematik gösterimi; (1) çatlak saplanması ve çatallaşma, (2) çatlak ucu körleme, (3) grafen kırılması, (4) çatlak sapması, (5) grafen tabaka kırılması, (6) çatlağın grafen tabakalarının arasına nüfuz etmesi (penetrasyon), (7) grafen tabakalarının ayrılması, (8) çatlağın grafen tabakalarının arasından geçmesi, (9) grafenin genişliği boyunca çatlak ilerlemesi, (10) grafenin kalınlığı boyunca çatlak ilerlemesi, (11) çatlak dallanması (Sepet, 2019)

### 5.2.3. Üç noktalı eğilme testi

Üretilen kompozit levhaların eğilme yükü etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyleri sonuçları Şekil 5.18'de verilmiştir. %1 h-nBN katkılı kompozitlerde küçük bir iyileşme görülmüş ve katkı oranı arttıkça, malzeme daha sünek hale geldiğinden mukavemet azalmaya başlamıştır. Bu durum literatürle uyumluluk göstermektedir. Chatterjee ve diğerleri (2012), grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme modül değerlerinin ağırlıkça %1 takviye oranına kadar düzenli olarak arttığını %2 takviye oranında eğilme modülünün düşmeye başladığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, h-nBN'nin artan eklenmesinde gerilme değerlerindeki azalmanın, daha fazla düğüm bölgeleri ve daha fazla ıslatılmamış temas bölgeleri oluşturarak ideal ıslatma oranının aşılmasından kaynaklandığına inanılmaktadır. Kuru kalan h-BN'nin temas alanlarında, yük iletiminin zayıflaması gerilme değerlerinde de azalmaya sebep olmuştur. Bazalt kumaşlı ve %1 h-nBN katkılı plakanın eğilme mukavemeti 293,88 MPa olurken minimum eğilme mukavemeti değeri ise %4 oranında katkılandırma ile tespit edilmiş ve 256,58 MPa olarak bulunmuştur. Tüm değerlerin ortalama standart sapması %6,28'dir. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum ve minimum eğilme değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler 493,65 MPa ve 554,5 MPa, minimum değerler ise 471,66 MPa ve 494,16 MPa olarak rapor edilmiştir. Tüm plakalar arasında minimum eğilme mukavemet değerlerine sahip numuneler bazalt kumaşlı, maksimum eğilme mukavemeti değerlerine sahip numuneler ise karbon kumaş takviyeli kompozitlerdir. Hibrit plakalarda ortalama standart sapma değeri %5,03'dür.

Ağırlıkça %1 h-nBN takviyesinin, saf bazalt kompozitin eğilme mukavemetini %1,56, saf hibrit kompozitin eğilme mukavemetini %0,76, saf karbon kompozitin eğilme mukavemetini %6,16 artırdığı bulunmuştur. Bu artışa, nano partiküller ile epoksi reçine arasında etkili bir arayüzey oluşması ve partiküllerin dislokasyonların hareketini kısıtlamasının neden olduğu düşünülmektedir. Bu orandan sonraki h-nBN takviyesinin, kompozitlerin mukavemetini sürekli olarak azalttığı ortaya çıkmıştır. Bu olayların nedenleri; h-nBN ve epoksi matrisi arasındaki zayıf arayüzey yapışması ve aglomerasyon kaynaklı h-nBN/matris arayüzeyinde meydana gelen çatlaklardır.



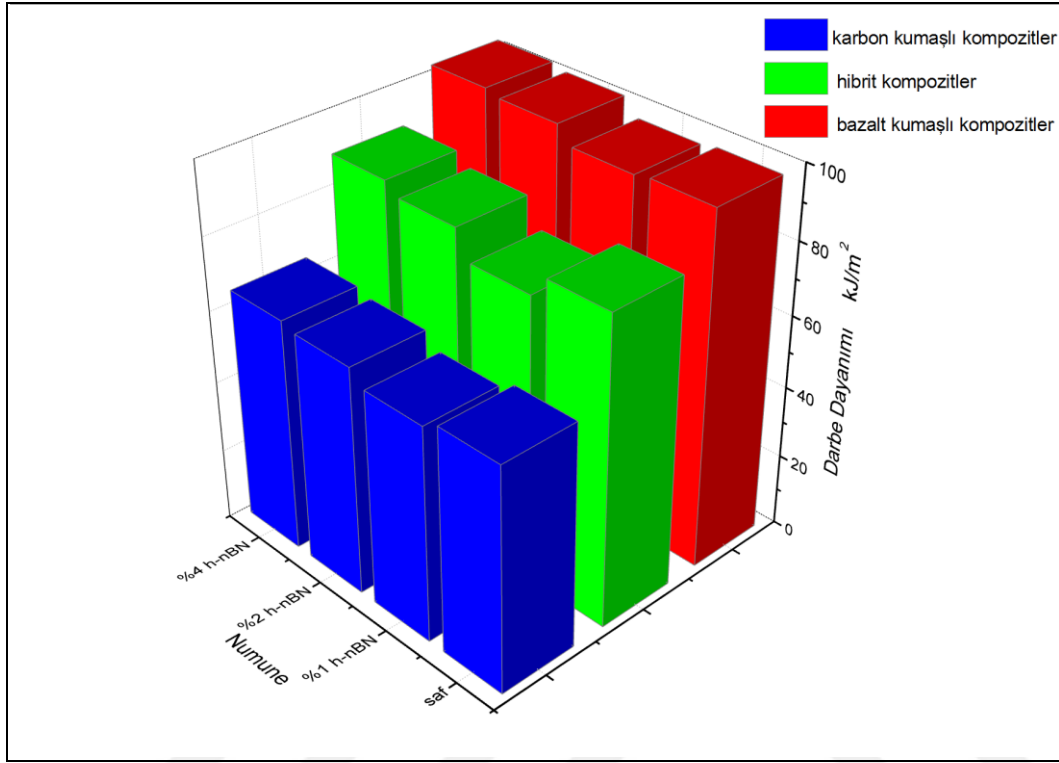
Şekil 5.18. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin eğilme mukavemeti diyagramları

Çalışmada kullanılan kompozitler için literatürde henüz h-nBN katkısı denenmemiştir. Yürütülen bu tez çalışması hegzagonal nano bor nitrür katkılı kompozitler için önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Bu açıdan bakıldığında h-nBN'nin ağırlıkça %1'lik değeri verilen üretim parametreleri ışığında en yüksek eğilme mukavemetinin alındığı katkı oranı olmaktadır. Ayrıca kompozit malzemelerin mukavemetine etkide bulunan parametrelerden biri de, elyaf/reçine oranıdır. Çizelge 5.3'e dikkat edilirse kompozitler için %1'lik h-nBN oranıyla maksimum ağırlıkça elyaf oranına ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

#### 5.2.4. Izod darbe testi

Izod darbe testi, h-nBN dolgu maddesinin kompozitlerin darbe dayanımı üzerindeki etkisini anlamak için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kompozitlerin yapılarına ilave edilen h-nBN katkısı malzemelerin darbe dayanımlarının artmasını sağlamıştır ve tüm plakalarda %4'lük katkı oranında maksimum darbe dayanımı elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %1 oranındaki katkıda meydana gelen hafif düşüşün kullanılan fiberlerin kırılabilirliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Yadhav, Govindaraju, Kiran ve Suresha,

2020). Artan katkı oranıyla fiber ve matris arasında daha iyi bir bağlantı geliştirilmiş, bu da darbe direncinin artmasına neden olmuştur.



Şekil 5.19. Farklı oranlarda h-nBN katkısına sahip kompozitlerin darbe dayanımı diyagramları

Bazalt kumaşlı ve %4 h-nBN katkılı plakanın darbe dayanımı  $102,63 \text{ kJ/m}^2$  olurken minimum darbe dayanımı değeri ise %1 oranında katkılandırma ile tespit edilmiş ve  $96,905 \text{ kJ/m}^2$  olarak bulunmuştur. Katkısız kompozite oranla %5 artış sağladığı hesaplanmıştır. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum ve minimum darbe dayanımı değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler  $89,39 \text{ kJ/m}^2$  ve  $64,9 \text{ kJ/m}^2$ , minimum değerler ise  $78,91 \text{ kJ/m}^2$  ve  $59,73 \text{ kJ/m}^2$  olarak rapor edilmiştir. Kompozitlerdeki h-nBN içeriği arttıkça malzeme sünek hale geldiğinden kopma için gereken enerji miktarıda artmıştır.

### 5.3. Mikrodalga Emilim Sonuçları

Bir malzemenin absorpsiyon davranışı hem iletim hem de yansımaya katsayıları incelenerek değerlendirilebilir. Malzemenin elektromanyetik absorpsiyon özelliğine sahip olması için, yansımaya ve iletim mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Başka bir deyişle, elektromanyetik

dalga geri yansıtılmamalı ve alıcıya iletilmemelidir. Bu bağlamda, emilim, yansıyan ( $R$ ) ve iletilen ( $T$ ) dalgalar arasındaki korelasyon ile bulunabilir;

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (5.1)$$

Burada, yansıma ( $R$ )  $S_{11}$ 'den ve iletim ( $T$ ) çoğu durumda aynı olan  $S_{12}$  veya  $S_{21}$  kullanılarak bulunabilir. Bu amaçla, aşağıdaki denklemler kullanılacaktır;

$$R(\omega) = S_{11}^2(\omega) \text{ ve } T(\omega) = S_{21}^2(\omega) = S_{12}^2(\omega) \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.1) ile (5.2) birleştirilirse;

$$A(\omega) = 1 - S_{11}^2(\omega) - S_{12}^2(\omega) \quad (5.3)$$

elde edilir.

Yüksek miktarda absorpsiyona sahip olmak için yansıma ve iletim en aza indirilmelidir. Örnek ve hava arasında iyi bir empedans eşleşmesi ile, dalganın penetrasyon miktarı maksimuma çıkarılacak ve bu da en aza indirgenmiş bir yansıma değerine ( $S_{11}$ ) yol açacaktır. Öte yandan, dalga iletimini önlemek için test edilen numunenin arkasına metalik bir tabaka yerleştirilmiş ve böylece iletim en aza indirmiştir ( $S_{21}$  veya  $S_{12}$ ). Nüfuz eden dalga, metalik plaka nedeniyle tamamen geri yansıyacak ve numunedeki elektromanyetik kayıplar, dalganın numunenin ön ve arka tarafı arasında ileri geri sıçramasına neden olacaktır. Bu işlem yansıma ve iletimi en aza indirecek ve numunenin emilim özelliğine yol açacaktır. Böylece emilen güç, yalnızca yansıyan dalga katsayısı ile ilişkilendirilecek ve Eşitlik (5.3) basitleştirilerek (5.4) halini alacaktır.

$$A(\omega) = 1 - S_{11}^2(\omega) \quad (5.4)$$

Ölçümler biri, gelen dalgayı oluşturan kaynak anten ve diğeri yansıyan elektrik alan değerini ölçen olmak üzere 2 adet horn anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plakaların  $S_{11}$  yansıma ölçümleri 3-18 GHz aralığında yapılmıştır.

Çizelge 5.6. Radar frekans bantları ve kullanım yerleri

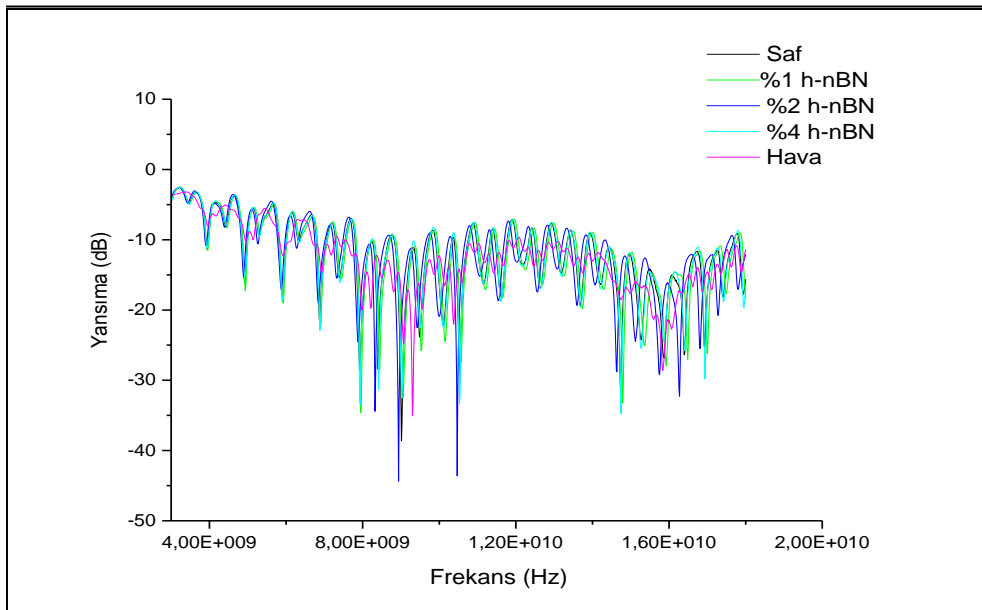
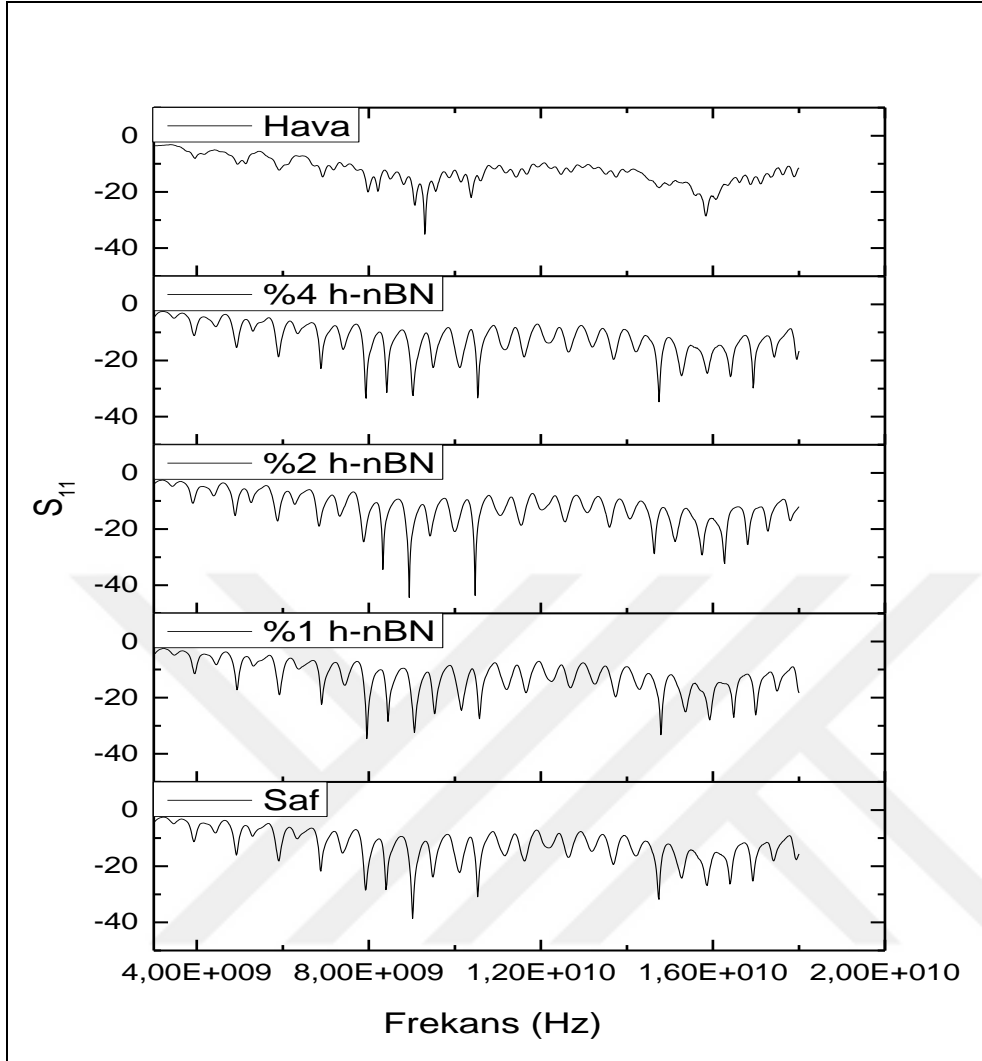
Bant	Frekans aralığı	Kullanım yeri
VFH (çok yüksek frekans)	30-300 MHz	Çok uzun menzilli gözetimler
UHF (ultra yüksek frekans)	300-1000 MHz	Çok uzun menzilli gözetimler
L	1-2 GHz	Uzun menzilli gözetimler, trafik kontrolü
S	2-4 GHz	Orta menzilli gözetim, trafik kontrol
C	4-8 GHz	Uzun menzilli gözetimler, hava durumu tespiti
X	8-12 GHz	Kısa menzilli tespitler, havadan önleme, füze savunma sistemler, haritalama, deniz radar sistemi
Ku	12-18 GHz	Yüksek çözünürlüklü haritalama, uydu yükseklik ölçme
K	18-27 GHz	Kullanım alanı kısıtlı
Ka	27-40 GHz	Havaalanı gözetim sistemi

Hazırlanan numuneler için saçılma parametreleri laboratuvar ortamında ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.20-22'de gösterilmiştir. Örneklerin iletim davranışları Şekil 5.23'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kompozitlerin yansımasının havaya çok yakın olduğu, yani enerjinin neredeyse hiçbirinin numuneden geri yansıtılmadığı görülebilmektedir. Bununla birlikte, bazı spesifik frekans bantlarında, bazı oranlarda katkılı numuneler havadan ve saf numunenin kendisinden daha düşük bir yansımaya davranışı göstermiştir. Yani, numuneden daha az geri yansımış ve sistemin diğer tarafına daha fazla enerji iletilmiştir. Plakaların yansımaya davranışlarının incelenmesi, örneklerin olası kullanım alanı hakkında bir fikir vermekle birlikte, test edilen örneklerin absorpsiyon

özelliklerini kontrol etmek için iletim davranışları da incelenmelidir. İletim eğrisinin büyüklüğü ne kadar düşük olursa, iletilen enerjinin miktarı o kadar düşük olur. Şekil 5.23 (a), (b), (c) görüldüğü gibi, kompozitler, gelen dalgaların çoğunu geri yansıtır ve sinyalin iletilmesine izin vermez. Yansıma ve iletim eğrilerini birlikte incelenirse, numunelerin belirli frekans bantlarında iyi bir emilim davranışı gösterdiği söylenebilir. Eş. 5.3 kullanılarak hesaplanan maksimum verimdeki numuneler ve absorbands değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir (Hesaplamalarda dB değerleri güç büyüklüğü (power magnitude) değerlerine dönüştürülerek işlem yapılmıştır).

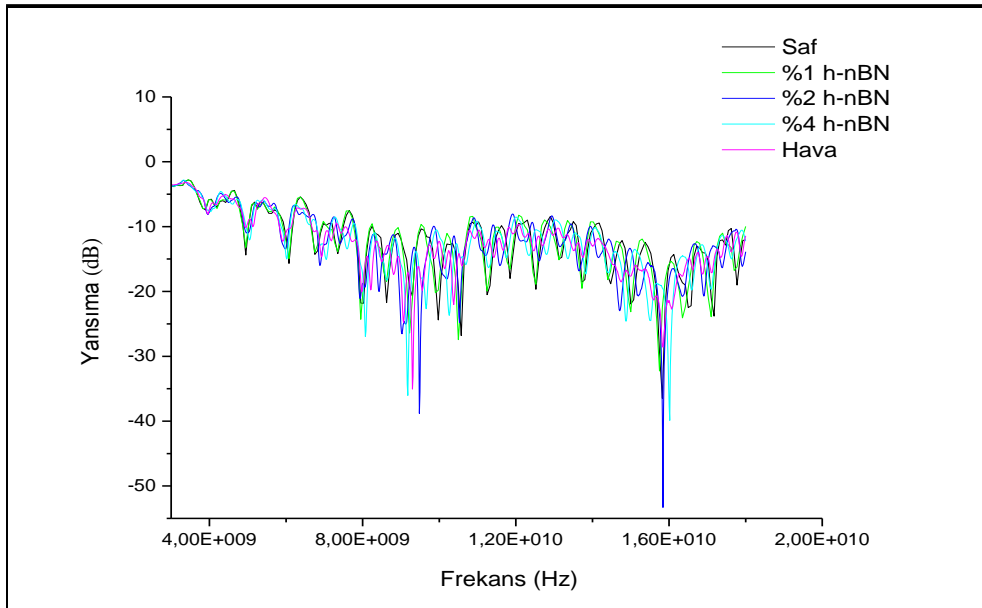
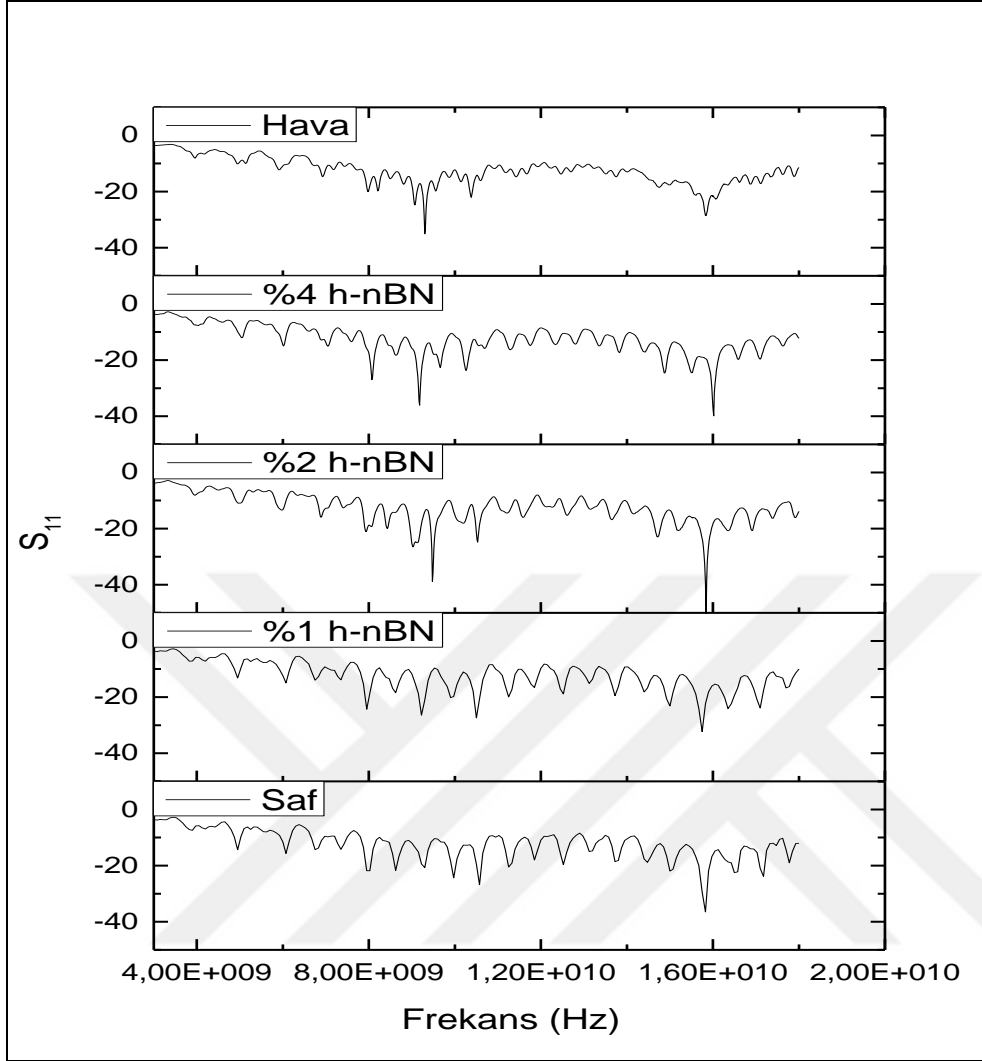
Çizelge 5.7. Maksimum verimdeki numune türleri ve absorbands değerleri

<b>Numune türü</b>	<b>Frekans (GHz)</b>	<b><math>S_{11}</math>(dB)</b>	<b><math>S_{12}</math>(dB)</b>	<b>Absorbans (%)</b>
Karbon kumaş+%2 h-nBN	8,94	-44,36	-41,79	99,997
Bazalt kumaş+%2 h-nBN	15,8	-53,31	-21,96	99,996
Hibrit+%2 h-nBN	10,5	-37,81	-56,81	99,9

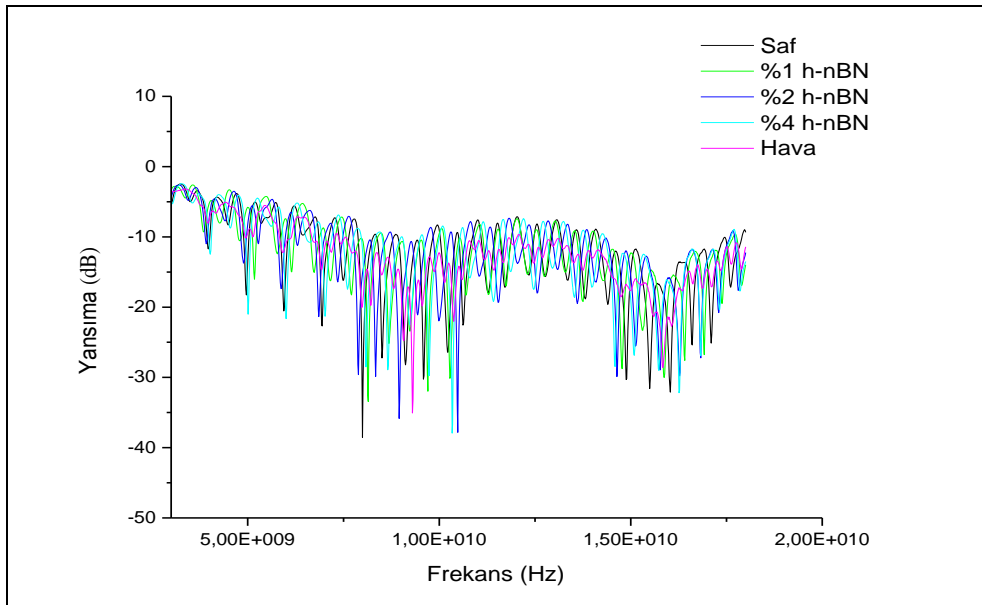
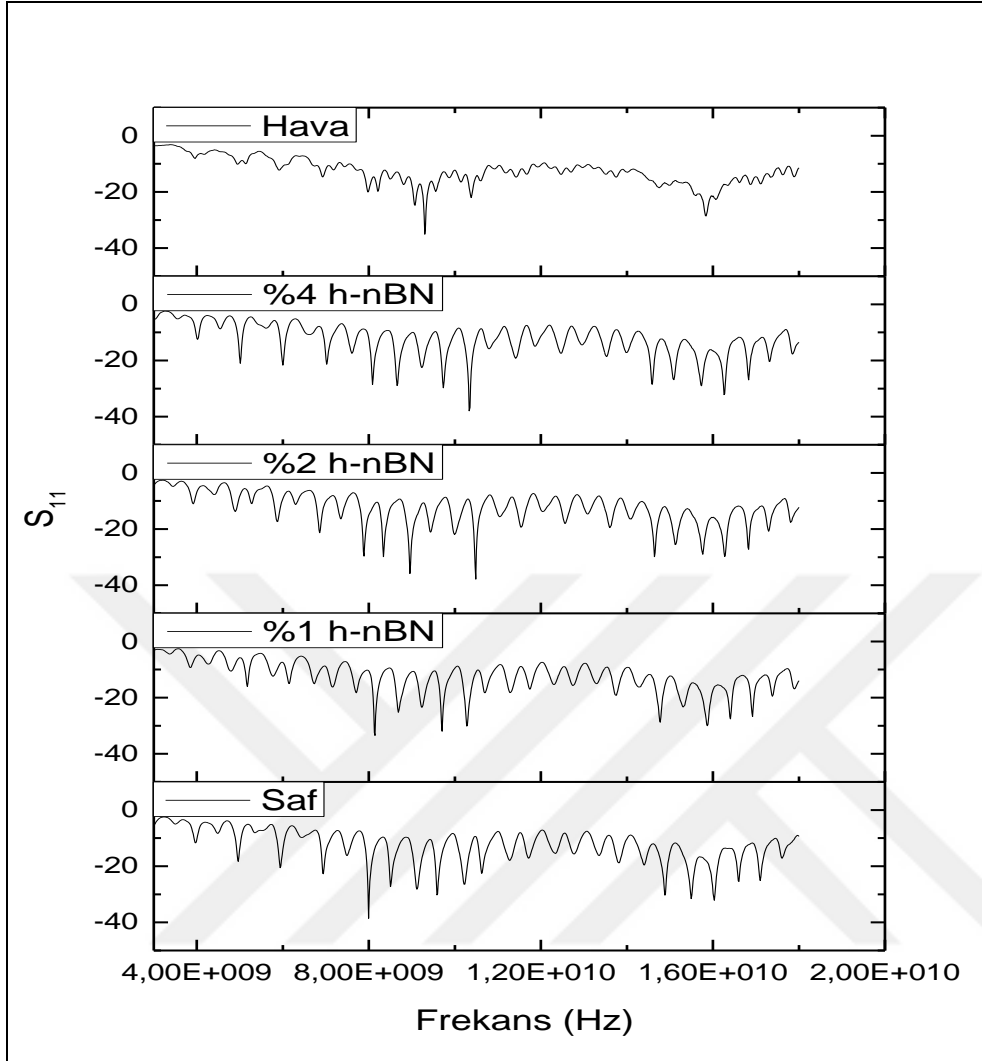


Şekil 5.20. 12 kat karbon kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı  $S_{11}$  (Yansım) grafikleri

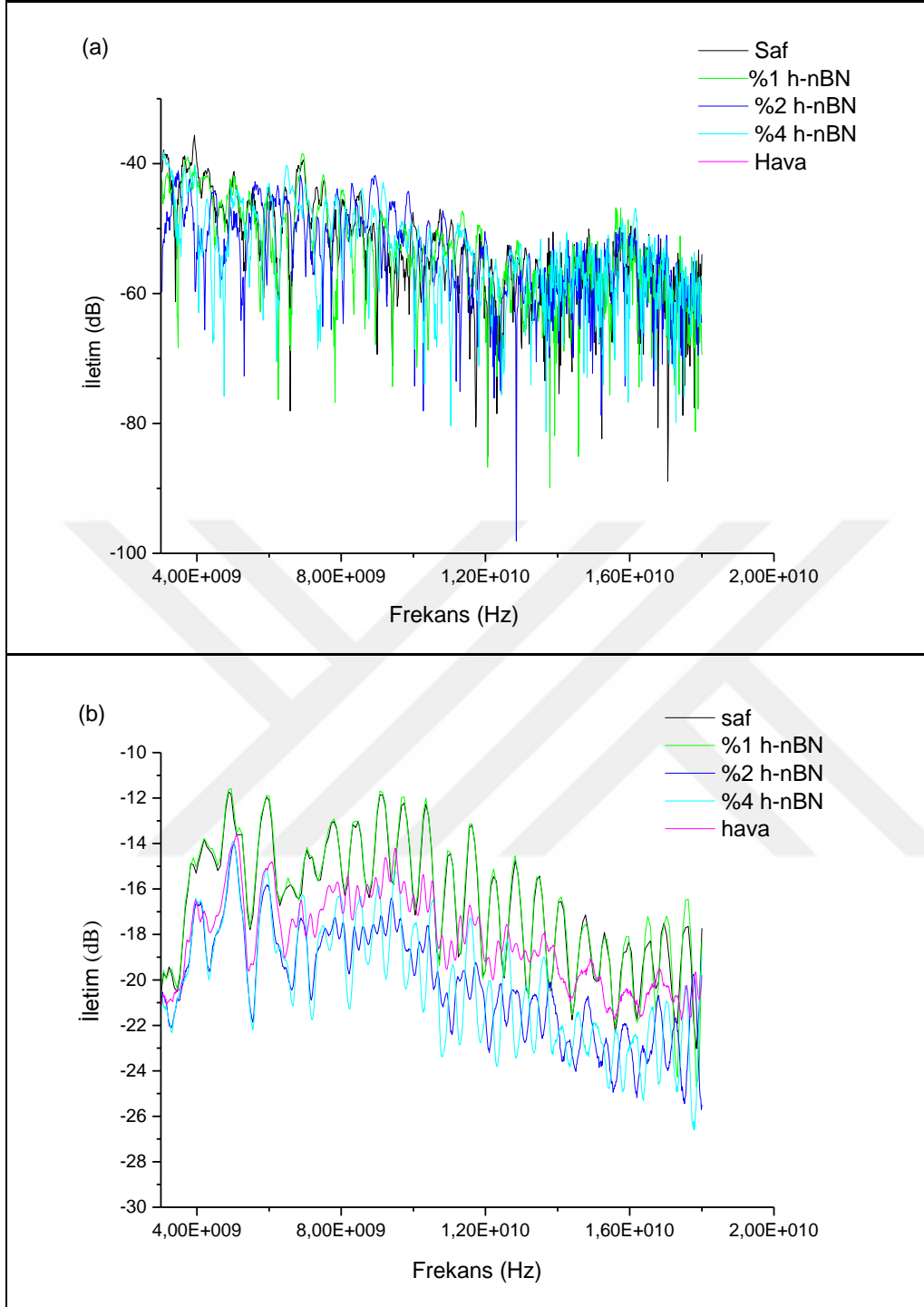




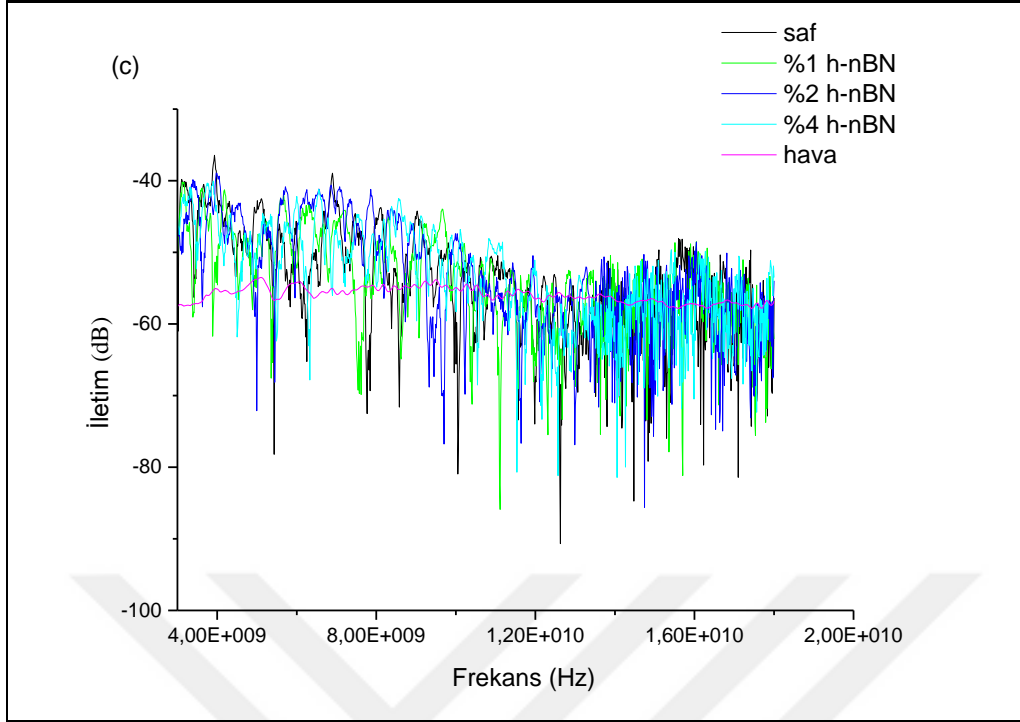
Şekil 5.21. 12 kat bazalt kumaş kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı  $S_{11}$  (Yansımada) grafikleri



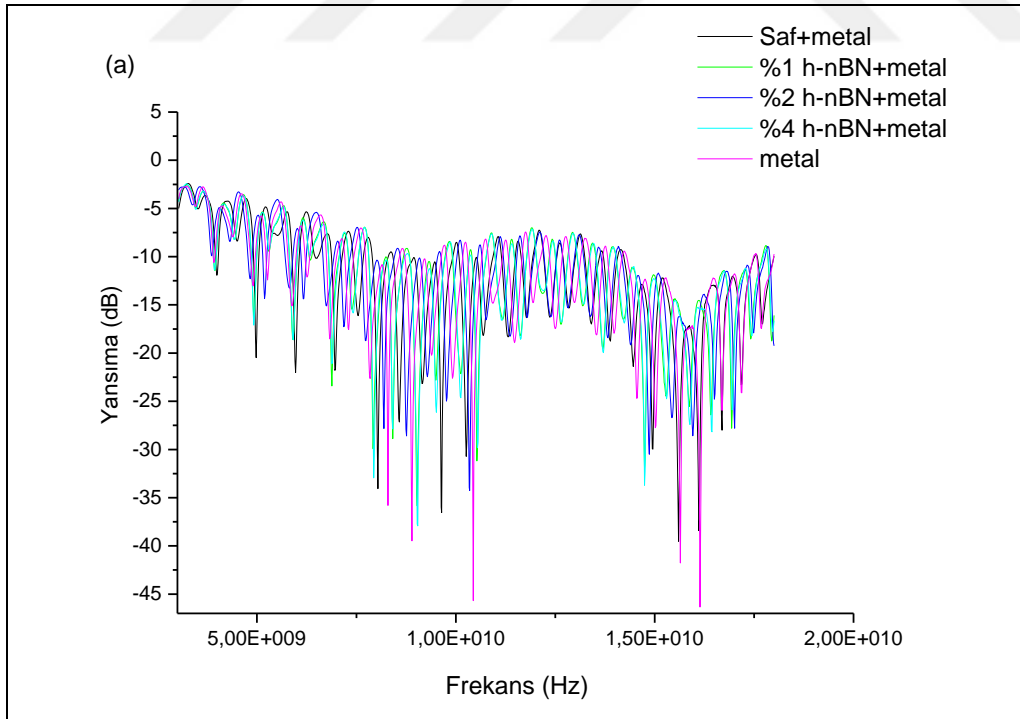
Şekil 5.22. 3 kat karbon+6 kat bazalt +3 kat karbon kumaş (hibrit) kullanılarak hazırlanmış kompozit plakaların 3-18 GHz frekans aralığı  $S_{11}$  (Yansıtım) grafikleri



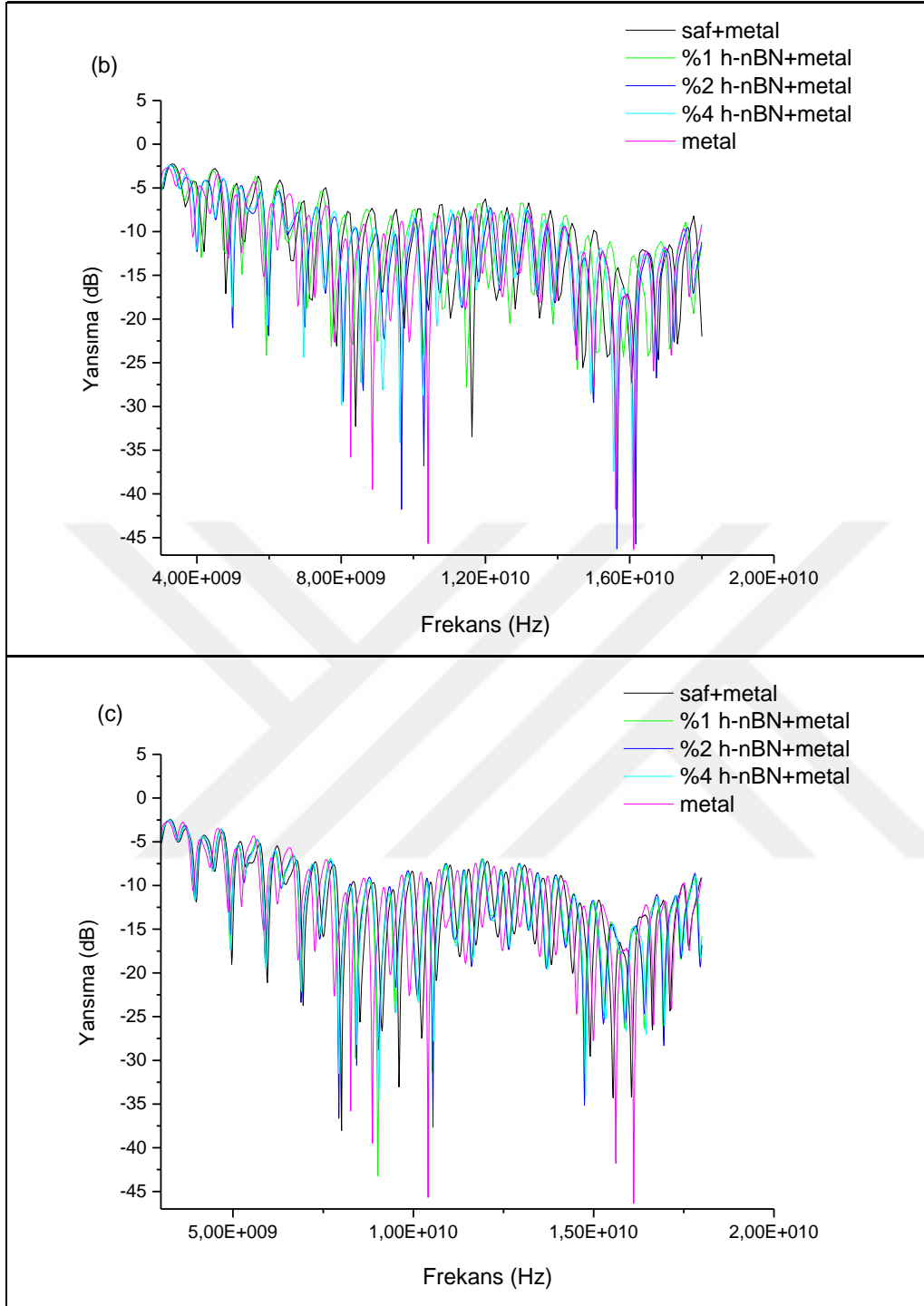
Şekil 5.23. 3-18 GHz frekans aralığı arasında numunelerin  $S_{12}$  (İletim) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar



Şekil 5.23. (Devam) 3-18 GHz frekans aralığı arasında numunelerin  $S_{12}$  (İletim) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar



Şekil 5.24. 3-18 GHz frekans aralığı arasında metal plakalı numunelerin  $S_{11}$  (Yansım) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar



Şekil 5.24. (Devam) 3-18 GHz frekans aralığı arasında metal plakalı numunelerin  $S_{11}$  (Yansıma) parametreleri (a) karbon kumaşlı plakalar (b) bazalt plakalar (c) hibrit plakalar

Kompozitlerin metal tabakalı yansıma davranışları Şekil 5.24 (a), (b), (c)'de gösterilmektedir. Özellikle 8-18 GHz aralığında katkılı numunelerin bazı yerlerde yansıma değerini -10 dB ve daha fazla düşürdüğü görülmektedir. Bu da demek oluyor ki çalışma frekansına bağlı olarak, daha iyi bir yansıma davranışı için kompozit örneği seçilebilir. Öte

yandan, yansıma bu frekanslarda minimum seviyeye ulaşsa da, diğer bazı frekans noktalarında/bantlarında daha yüksek yansıma sağlamıştır. Bu bölümler, özellikle çok portlu sistemler için yalıtım amacıyla düşünülebilir (Bakal, Yapıcı, Karaaslan ve Akgöl, 2020). Tek başına metalik tabaka ile karşılaştırıldığında, kompozitler belirli frekans bantlarında ek engelleme davranışı sergilemiştir.



## 6. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

### 6.1. Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, ayrı ayrı karbon kumaş, bazalt kumaş ve hem karbon hem bazalt (hibrit) kumaş takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ayrıca epoksi matris, farklı miktarlarda hegzagonal nano bor nitrür kullanılarak modifiye edilmiştir. Toplamda on iki farklı malzeme elde edilmiş ve bunların mekanik, termal ve yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. Ayrıca network analizörü kullanılarak mikrodalga emilim özellikleri incelenmiştir. Kompozit malzemenin yapısına ağırlıkça %0; %1; %2; %4 oranlarında h-nBN tozu katılmıştır. Mekanik özelliklerinin incelenmesi için üç nokta eğilme, Izod darbe ve çekme deneyleri yapılmıştır. Nano partikül ilavesinin kompozitlerin termal özellikleri üzerindeki etkileri ise diferansiyel taramalı kalorimetri ve termal gravimetri analizleri ile incelenmiştir. Numunelerdeki organik bileşenleri belirlemek için FTIR analizleri yapılmıştır. Kompozitlerin yapısal ve mikroyapısal özellikleri, X-ışını difraktometrisi kullanılarak kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi ve nano bor nitrürün dağılımları taramalı elektron mikroskobu-EDS Haritalama, çekme testinden sonra kırık yüzey morfolojileri ise stereo mikroskop ile incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.

- ❖ Elle yatırma ve vakum torbalama olmak üzere iki üretim yöntemin eş zamanlı kullanımı ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece nano partiküllerin kumaş aralarında süzülme, belli bölgelerde toplanma ve eşit dağılmama sorunları azaltılmıştır.
- ❖ Bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları incelenecek olursa saf plakanın  $T_g$  değeri 53,07°C ve %1, %2, %4 h-nBN katkılı plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla 50,58°C, 66,25°C ve 65,58°C olarak belirlenmiştir. Karbon kumaş takviyeli plakalar irdelenecek olursa katkısız plakanın  $T_g$  değeri 65,79°C ve %1, %2, %4 h-nBN katkılı plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla 65,64°C, 65,66°C ve 67,84°C olarak tespit edilmiştir. Hibrit kompozitlerin DSC sonuçlarında ise saf plakanın  $T_g$  değeri 65,38°C ve %1, %2, %4 h-nBN katkılı plakaların  $T_g$  değerleri ise sırasıyla 66,69°C, 67,46°C ve 67,53°C olarak tespit edilmiştir.  $T_g$  değerlerinde katkısız numunelere kıyasla katkılandırma ile bir miktar arttığı ancak katkılandırma miktarının artışıyla ciddi bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.

- ❖ TGA eğrileri incelendiğinde tek aşamalı bir bozunma gerçekleştiği ve bozunmaların yaklaşık 320°C’de başladığı görülmektedir. Reçine ve katkı elemanı kimyasal olarak birbirine bağlanma göstermediklerinden bozunma karakterleri termal olarak değişkenlik göstermemiştir.
- ❖ FTIR spektrumlarında sadece bazalt, sadece karbon kumaş takviyeli ve hibrit plakalardan alınan numunelerde %4 h-nBN katkılı kompozitlerin daha derin pikler verdiği, h-nBN ile modifiye edilen epoksi reçinede gözlenen titreşim bantlarının moleküller arası etkileşimin bir sonucu olarak daha yüksek frekanslara kaydığı tespit edilmiştir. Ayrıca bor nitrüre karşılık gelen bantların, epoksi reçinesindeki fonksiyonel grupların bantlarıyla çakışması nedeniyle yeni bir bant oluşumu gözlemlenmemiştir.
- ❖ XRD modellerinde epoksi matrislerden gelen geniş, yayvan amorf yapının yanı sıra, zayıf karakteristik h-nBN (002), (100) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. Tüm kompozit plakalar arasında, 26,8°’de bulunan bor nitrürün (002) düzlemine ait karakteristik piki, %4 oranında katkılandırma yapıldığında kısmen görülebilmektedir. %1 ve %2 oranlarında yapılan katkılandırmalarda bor nitrür pikleri gözlenmemiştir. Epoksi matrislerden gelen yoğun amorf yapının mevcut bor nitrür piklerini baskıladığı düşünülmektedir.
- ❖ Tüm SEM mikrograflarda görülen epoksi matrisin fiberleri tamamen sarıp ıslatması üretim yönteminin verimliliğini ispatlamaktadır. Ancak bazı bölgelerde çekme mukavemetinde de bir azalmaya neden olan boşluklar bulunmaktadır. Fiber katmanları açıkça görülmektedir. EDS haritalama sonuçlarına göre; karbon kumaş ile yapılmış üretimlerde hem takviye elemanından hem reçineden yüksek oranda karbon geldiği için baskın yapı karbon olarak görülmüştür, bazalt kumaşlı üretimlerde h-nBN’lerin genel olarak homojen şekilde dağıldığı hibrit kompozitlerde ise yer yer kısmi aglomerasyonların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca % 1’lik h-nBN katkılı üretimlerde birim alana oldukça az miktarda katkı elemanı düştüğünden bor nitrür tabakaların epoksi matris içine gömüldüğü belirlenmiştir. Katkı yüzdesi arttıkça birim alana daha fazla h-nBN düşmüş ve böylece EDS haritalama sonuçlarında h-nBN daha belirgin gözlenebilmiştir.
- ❖ Ağırlıkça fiber oranları tüm plakalarda %1 h-nBN katkılı üretimlerde maksimum değerdedir. Kompozit malzemelerde yük taşıyıcılar büyük oranda fiberlerdir. Çekme deneyi sonuçlarında da en yüksek mukavemetlerin %1’lik katkılarda ortaya çıkması sonuçları doğrular niteliktedir.



- ❖ Tüm plakaların kalınlık değerleri 2,2 mm ile 3,05 mm arasında, teorik yoğunluk değerleri ise  $1,45 \text{ g/cm}^3$  ile  $1,86 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir.
- ❖ Ağırlıkça %1, %2 ve %4 h-nBN takviye oranlarına sahip numunelerde çekme mukavemetin en yüksek değerleri, ağırlıkça %1 h-nBN takviye oranına sahip olan numunelerde ortaya çıkmıştır. Ağırlıkça %1 h-nBN takviye oranından daha yüksek oranlara sahip numunelerin çekme özelliklerinde düşüş eğilimi görülmüştür. Bu düşüşün nedeninin, SEM-EDS haritalama sonuçlarından saptanan h-nBN aglomerasyonu olduğu kanısına varılmıştır. Bazalt kumaşlı ve %1 h-nBN katkılı plakanın çekme mukavemeti 484,2 MPa olurken minimum çekme mukavemeti değeri ise %4 oranında katkılandırma ile tespit edilmiş ve 370 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum ve minimum çekme değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler 488,1 MPa ve 638,16 MPa, minimum değerler ise 430,1 MPa ve 570,43 MPa olarak rapor edilmiştir.
- ❖ Çekme deneyleri sonrasında hasara uğramış numunelerin deformasyon yüzeylerinden yapılan stereo mikroskop incelemelerinde tespit edilen hasar mekanizması literatürle benzerlik göstermektedir. h-nBN'lerin epoksi matris içerisine katılması ile kırılma yüzeylerinin morfolojisi değiştiği ispatlanmıştır. Epoksi matrisin çatlaması ile hasarın başladığı ve devam eden yük artışıyla çatlak elyaflara ulaşarak fiberlerin kırılıp koptuğu anlaşılmıştır.
- ❖ Üç noktalı eğilme deneyleri sonucunda %1 h-nBN katkılı kompozitlerde iyileşme görülmüş katkı oranı arttıkça, malzeme daha sünek hale geldiğinden mukavemet azalmaya başlamıştır. Bazalt kumaşlı ve %1 h-nBN katkılı plakanın eğilme mukavemeti 293,88 MPa olurken minimum eğilme mukavemeti değeri ise %4 oranında katkılandırma ile tespit edilmiş ve 256,58 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum ve minimum eğilme değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler 493,65 MPa ve 554,5 MPa, minimum değerler ise 471,66 MPa ve 494,16 MPa olarak rapor edilmiştir.
- ❖ Ağırlıkça %1 h-nBN takviyesi sonucunda, saf bazalt kompozitin eğilme mukavemetini %1,56, saf hibrit kompozitin eğilme mukavemetini %0,76, saf karbon kompozitin eğilme mukavemetini %6,16 artırdığı bulunmuştur.

- ❖ Tüm plakalar arasında minimum eğilme mukavemet değerlerine sahip numuneler bazalt kumaşlı, maksimum eğilme mukavemeti değerlerine sahip numuneler ise karbon kumaş takviyeli kompozitler olarak tespit edilmiştir.
- ❖ Bazalt kumaşlı üretimlerde %4 h-nBN katkı oranında saf kompozite göre darbe dayanımında %5 oranında artış gerçekleşmiştir. Hibrit ve karbon kumaşlı kompozitlerde de aynı katkı oranlarında maksimum darbe dayanımı değerleri tespit edilmiş ve sırasıyla maksimum değerler 89,39 kJ/m<sup>2</sup> ve 64,9 kJ/m<sup>2</sup> olarak rapor edilmiştir. h-nBN içeriği arttıkça malzeme sünek hale geldiğinden kopma için gereken enerji miktarında arttığı söylenebilir.
- ❖ Mekanik deneylerin sonuçlarından h-nBN ilavesinin belirli oranlarda malzemenin mekanik performansını artırdığı anlaşılmıştır.
- ❖ h-nBN katkısının malzemenin mikrodalga absorplama yeteneğini artırıcı bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ Özellikle 8-18 GHz aralığında katkılı numunelerin bazı yerlerde yansıma değerini -10 dB ve daha fazla düşürdüğü, %2 oranında katkıya sahip; karbon kumaş takviyeli plakada 8,94 GHz'de, bazalt kumaş takviyeli plakada 15,8 GHz'de ve hibrit plaka da 10,5 GHz frekans değerlerinde %99 oranında mikrodalga emilimi gerçekleştiği rapor edilmiştir.
- ❖ Ayrıca numunelerin metalik tabakalarla kullanıldığında belirli frekans bantlarında iyi bir absorpsiyon davranışı sundukları sonucuna varılmıştır. Diğer bazı frekans bantlarında yüksek yansıma davranışları ile izolasyon uygulamaları için kullanılabilir oldukları tespit edilmiştir. Son olarak, kompozitlerin istenen bir davranışla istenen bir frekans bandında çalışacak şekilde ayarlanabileceği anlaşılmıştır.

Tez çalışması boyunca yapılan detaylı deney ve analizler kompozitlere eklenen h-nBN partiküllerinin malzemenin mekanik, termal, mikroyapı ve mikrodalga emilim özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Çalışmalar sonucunda referans malzemeleri daha nitelikli bir kompozit ürüne dönüştürülmüştür.

## 6.2. Öneriler

Nano partikül katkılı kompozitlere uygulanan kapsamlı deney ve analizlerden sonra ileriki çalışmalar için şu öneriler yapılmaktadır;

- ❖ Katkı elemanı oranının optimizasyonu, mekanik özellikleri optimize etmenin yanı sıra ağırlık ve masrafı en aza indirmek için önemli bir araç olabilir.
- ❖ Farklı elyaf dizilimlerinin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.
- ❖ Çalışmada kullanılan h-nBN haricinde farklı katkı elemanlarının kompozitler üzerindeki etkileri incelenebilir.
- ❖ Katkı oranları değiştirilerek test ve analizler yinelenabilir.
- ❖ Üretimi yapılmış kompozitlerin aşınma, korozyon gibi farklı performans deneyleri yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- Alves, F. L., Bapista, A.M. and Marques, A.T. (2016). *3- Metal and ceramic matrix composites in aerospace engineering*, Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering Processing, Properties and Applications, WoodHead publishing, 59-99.
- Ashok, K.G., Kalaichelvan, K., Elango, V., Damodaran, A., Gopinath, B. and Raju M. (2020). Mechanical and morphological properties of luffa/carbon fiber reinforced hybrid composites, *Materials Today: Proceedings*, 33, 637-641.
- ASTM D3039/D3039M. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing Materials.
- ASTM 7264/D 7261M-07. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing Materials.
- ASTM D256. Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. American Society for Testing Materials.
- Ayan, M. Ç., Kiriş, S., Yapici, A., Karaaslan, M., Akgöl, O., Altıntaş, O. and Ünal, E. (2020). Investigation of cotton fabric composites as a natural radar-absorbing material, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, ISSN: 0002-2667.
- Bai, Y., Zhong, B., Yu, Y., Wang, M., Zhang, J., B. Zhang, Gao, K., Liang, A., Wang, C. and Zhang, J. (2019). Mass fabrication and superior microwave absorption property of multilayer graphene/hexagonal boron nitride nanoparticle hybrids, *NPJ 2D Mater Appl.*, 3, 28.
- Bakal, F., Yapici, A., Karaaslan, M. and Akgöl, O. (2020). Microwave absorption performance of hexagonal nano boron nitride doped basalt fabric reinforced epoxy composites, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, DOI (10.1108/AEAT-06-2020-0126).
- Bakal Gumus, F. ve Yapici, A. (2020). Mechanical properties of carbon/basalt fabric hybrid composites doped with hexagonal boron nitride nanopowders. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9, 121009.
- Balasubramanian, K., Sultan, M.T.H. and Rajeswari, N. (2018). Manufacturing techniques of composites for aerospace applications, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 55-67.
- Baradeswaran, A., Vettivel, S.C., Perumal, A.E., Selvakumar, N., and Issac, R.F. (2014). Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B<sub>4</sub>C and graphite reinforced aluminium hybrid composites, *Materials & Design*, 63, 620-632.

- Bazhin, P.M., Konstantinov, A.S., Chizhikov, A.P., Pazniak, A.I., Kostitsyna, E.V., Prokopets, A.D., Stolin, A.M. (2021). Laminated cermet composite materials: The main production methods, structural features and properties (review), *Ceramics International*, 47 (2), 1513-1525.
- Brant, J.A., Brunetta, C.D. and Aitken, J.A. (2013). 5.09 - Chalcogenides and Nonoxides, *Comprehensive Inorganic Chemistry II (Second Edition) From Elements to Applications*, 5, 2013, 213-283.
- Bulut, M. (2017). Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites Part B*, 122, 71-78.
- Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. (2007). *Materials science and engineering: An introduction* (7. Edition). New York: John Wiley & Sons, 579-580.
- Castanie, B., Bouvet, C. and Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, *Composites Part C*, 1, 100004.
- Cevahir, A. (2017). 5- Glass fibers. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 99.
- Chandramohan, D. and Bharanichandar, J. (2013). Natural fiber reinforced polymer composites for automobile accessories, *Am. J. Environ. Sci.*, 9, 494-504.
- Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N., Schlagenhauf, L., Nüesch, F. ve Chu, B. (2012), Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites, *Carbon*, 50 (15), 5380-5386.
- Chawla, K.K. (2012). *Composite materials: Science and engineering*. New York: Springer Science & Business Media, 3-6.
- Chen, J., Wang, K. and Zhao Y. (2018). Enhanced interfacial interactions of carbon fiber reinforced PEEK composites by regulating PEI and graphene oxide complex sizing at the interface *Compos. Sci. Technol.*, 154, 175-186.
- Chung, D.D.L. (2019). A Review of Multifunctional Polymer-Matrix Structural Composites, *Composites Part B: Engineering*, 160, 644-660.
- Correia, N.C., Robitaille, F., Long, A.C., Rudd, C.D., Šimáček, P., Advani, S.G. (2005). Analysis of the Vacuum Infusion Moulding Process: I. Analytical Formulation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 1645-1656.
- Cui, M., Ren, S., Qin, S., Xue, Q., Zhao, H. and Wang, L. (2017). Non-covalent functionalized hexagonal boron nitride nanoplatelets to improve corrosion and wear resistance of epoxy coatings, : *RSC Adv.*, 7, 44043.
- Davim, J.P., Reis, P. and Antonio C.C. (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Compos. Sci. Technol.*, 64 (2), 289-297.

- Deák, T. ve Czigány, T. (2009). Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: a comparison, *Textil. Res. J.*, 79, 645-651.
- Demir, O. (2017). Karbon Nanotüp Takviyeli Cam-Karbon Elyaf/Epoksi Hibrit Nanokompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Düşük Hızlı Darbe Davranışları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Demirci, İ. ve Avcı, A. (2017). Deniz suyu korozyon ortamında bazalt/epoksi kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 16, 44-54.
- Drzewdzon, J., Jacewicz, D., Sielicka, A. and Chmurzynski, L. (2019). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques, *Trends in Analytical Chemistry*, 110, 51-56.
- Egbo, M. K. (2020). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>.
- Eichler, J. and Lesniak, C. (2008). Boron nitride (BN) and BN composites for high-temperature applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 28 (5), 1105-1109.
- Elmahdy, A. and Verleysen, P. (2020). Comparison between the mechanical behavior of woven basalt and glass epoxy composites at high strain rates, *Materials Today: Proceedings*, baskıda.
- Erden, S. and Ho, K. (2017). *3 - Fiber reinforced composites*, *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 51-79.
- Fazio, D. D., Cuomo, S., Boccarusso, L., Pinto, F., Durante, M. and Meo, M. (2020). Design and characterization of hybrid hemp/carbon laminates with improved impact resistance, *Materials Today: Proceedings*, baskıda.
- Feng, P., Song, G., Li, X., Xu, H., Xu, L., Lv, D., Zhu, X., Huang, Y. and Ma, L. (2021). Effects of different “rigid-flexible” structures of carbon fibers surface on the interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites, *Journal of Colloid and Interface Science*, 583, 13-23.
- Glass D. (2008). Ceramic matrix composites (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles, *Proceedings of the AIAA Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, <https://doi.org/10.2514/6.2008-2682>.
- Güler, Ö. and Bağcı, N. (2020). A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3), 6808-6833.

- Harlow, G. S., Lundgren, E. and Escudero, M. (2020). Recent advances in surface x-ray diffraction and the potential for determining structure-sensitivity relations in single-crystal electrocatalysis, *Current Opinion in Electrochemistry*, 23, 162-173.
- Hayward, M.R., Johnston, J.H., Dougherty, T. and De Silva, K. (2019). Interfacial adhesion: improving the mechanical properties of silicon nitride fibre - epoxy polymer composites, *Compos. Interfac.*, 26, 263-273.
- Inkson, B.J. (2016). 2- Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Woodhead publishing, 17-43.
- İnternet: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN). “Dünya Bor Rezervlerinin Dağılımı (2014)”. <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/rezervler/26> Son erişim tarihi: 22 Şubat 2019
- Katunin, A., Krukiewicz, K., Turczyn, R., Sul, P., Łasica, A., and Bilewic, M. (2017). Synthesis and Characterization of the Electrically Conductive Polymeric Composite for Lightning Strike Protection of Aircraft Structures, *Composite Structures*, 159, 773-783.
- Kaw, A.K. (2006). *Mechanics of Composite Materials* (2. Edition). Boca: Raton Taylor & Francis, 16.
- Kayatekin I. (2006). Synthesis and characterization of buffer layers and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  superconducting coatings by chemical solution deposition. M.Sc. Thesis, *Dokuz Eylul University*, Izmir.
- Khandelwal, S. ve Rhee, K. Y. (2020) Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface, *Composites Part B: Engineering*, 192, 108011.
- Komori, K., (2020). Chapter 1 - Macroscopic ductile fracture phenomena, *Ductile Fracture in Metal Forming Modeling and Simulation*, Academic press, 1-48.
- Konstantinou, A. C., Patsidis, A. C. and Psarras, G. C. (2020) Boron nitride/epoxy resin nanocomposites: development, characterization and functionality, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09933-z>.
- Kumar, A. and Gupta, R. K. (2003). *Fundamentals of Polymer Engineering*, New York: CRC Press, 497.
- Lee, D., Song, S.H., Hwang, J., Jin, S.H., Park, K.H., Kim, B.H., Hong, S.H. and Jeon, S. (2013). Enhanced mechanical properties of epoxy nanocomposites by mixing noncovalently functionalized boron nitride nanoflakes, *Small*, 9, 2602–2610.
- Lim, JI., Rhee, KY., Kim, HJ. and Jung, DH. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites, *Carbon Lett.*, 15, 125–128.

- Mahesh, V., Joladarashi, S., Satyabodh, M. and Kulkarni, A. (2020). Comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load, *Defence Technology*, baskıda. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.002>
- Mahltig, B. (2018). Basalt fibers. *Inorg. Compos. Fibers* (1 Edition). Woodhead Publishing, 195.
- Maity, P., Kasisomayajula, S. V., Parameswaran, V., Basu, S. and Gupta, N. (2008). Improvement in surface degradation properties of polymer composites due to pre-processed nanometric alumina fillers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15.
- Majety, S., Cao, X., Dahal, K. R., Pantha, B. N., Li, J., Lina, J. Y. and Jiang, H. X. (2012). Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8268:70- DOI: 10.1117/12.914084.
- Mallick, P.K. (2007). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design* (3. Edition). Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 24-27.
- MacLean-Blevins, M. (2018). 2 - Material selection—which plastic to use?, *Designing Successful Products with Plastics Fundamentals of Plastic Part Design* (1 Edition), Plastics Design Library, 19-50.
- Matykiewicz, D., Barczewski, M., Knapski, D. and Skórczewska, K. (2017). Hybrid effects of basalt fibers and basalt powder on thermomechanical properties of epoxy composites, *Compos. B Eng.*, 125, 157-164.
- May, M., Rupakula, G.D. and Matura, P. (2020). Non-polymer-matrix composite materials for space applications, *Composites Part C: Open Access*, 3, 100057.
- McBeath S. (2000). Competition Car Composites, *A Practical Handbook*, United Kingdom: Haynes Publishing.
- McKeen, L.W. (2014). 1 - Introduction to Plastics, Polymers, and Their Properties, *The Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers* (Third Edition) Plastics Design Library, 1-45.
- Moniruzzaman, M., Du, F., Romero, N. and Winey, K. I. (2006). Increased Flexural Modulus and Strength in SWNT / Epoxy Composites by a New Fabrication Method, *Polymer*, 47, 293-298.
- Qin Q.H. (2015). *1 - Introduction to the composite and its toughening mechanisms, Toughening Mechanisms in Composite Materials*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 1-32.
- Rawat, P. and Singh, K.K. (2017). Damage tolerance of carbon fiber woven composite doped with MWCNTs under low-velocity impact, *Procedia Engineering*, 173, 440-446.



- Rezaei, F., Yunus, R. and Ibrahim, N.A. (2009). Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiberreinforced polypropylene composites, *Materials and Design*, 30 260–263.
- Saba, N., Jawaid, M. and Sultan, M.T.H. (2019). 1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials, *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 1-12.
- Sarasini, F., Tirillò, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L. (2014). Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt–carbon/epoxy composites. *Composites Part B*, 59, 204–220.
- Schindler, A., Doedt, M., Gezgin, Ş., Menzel, J. and Schmölder, S. (2017). Identification of polymers by means of DSC, TG, STA and computer-assisted database search, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129, 833–842.
- Sepet H. (2019). Grafen takviyesinin düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız bazalt elyaf takviyeli kompozit basınçlı kapların yorulma davranışlarına etkisi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, Konya.
- Shaffer, G.D. (1993). An archaeomagnetic study of a wattle and daub building collapse, *J. Field Archaeol.*, 20, 59-75.
- Singh, Y., Singh, J., Sharma, S., Lam, T.D. and Nguyen, D.N. (2020). Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (6), 15593-15603.
- Spasojevic, P. M. (2019). Chapter 15 - Thermal and Rheological Properties of Unsaturated Polyester Resins-Based Composites, *Unsaturated Polyester Resins Fundamentals, Design, Fabrication, and Applications*, Elsevier, 367-406.
- Subagia, A., Kim, Y., Tijjing, L.D., Kim, C.S. and Shon, H. K. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites: Part B*, 58, 251–258.
- Sujon, A. S., Habib, M. A. and Abedin, M. Z. (2020). Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5), 10970-10981.
- Sun, G., Tong, S., Chen, D., Gong, Z. and Li, Q. (2018). Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers, *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 636–651.
- Tanzi, M. C., Farè, S. and Candiani, G. (2019). Chapter 1- Organization, Structure, and Properties of Materials, *Foundations of Biomaterials Engineering*, Academic Press, 3.

- Tsai, S. (2017). *Introduction to composite materials* (2.Edition). Boca Raton:Routledge, 106-108.
- Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Sahin, Ö. S., Avcı, A. and Ekrem, M. (2014). Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Applied Surface Science*, 318, 37–42.
- Varley, D., Yousaf, S., Youseffi, M., Mozafari, M., Khurshid, Z. and Sefat, F. (2019). 13 - Fiber-reinforced composites, *Advanced Dental Biomaterials*, 301-315.
- Vasiliev, V. V. and Morozov, E. V. (2013). *Chapter 1– Introduction, Advanced Mechanics of Composite Materials* (Third Edition), 1-27.
- Vijay, V., Siva, S., Sreejith, K.J., Prabhakaran, P.V., Devasia, R. (2018). Effect of boron inclusion in sioc polymer derived matrix on the mechanical and oxidation resistance properties of fiber reinforced composites, *Materials Chemistry and Physics*, 205, 269-277.
- Vinci, A., Zoli, L., Galizia, P. and Sciti, D. (2020). Influence of  $Y_2O_3$  addition on the mechanical and oxidation behaviour of carbon fibre reinforced  $ZrB_2/SiC$  composites, *Journal of the European Ceramic Society*, 40 (15), 5067-5075.
- Wang, B., Fu, Q., Li, H., Qi, L. and Liu, Y. (2021). Mechanisms of simultaneously enhanced mechanical and tribological properties of carbon fabrics/phenolic resin composites reinforced with graphite nanoplatelets, *Journal of Alloys and Compounds*, 854, 157176.
- Wang, F.K. (2017). Chapter 6 - Carbon Fibers and Their Thermal Transporting Properties, *Thermal Transport in Carbon-Based Nanomaterials Micro and Nano Technologies*, 135-184.
- Wang, M., Wang, H., An, L., Zhang, B., Huang, X., Wen, G., Zhong, B. and Yu, Y. (2020). Facile fabrication of Hildewintera-colademonis-like hexagonal boron nitride/carbon nanotube composite having light weight and enhanced microwave absorption, *Journal of Colloid and Interface Science*, 564, 454-466.
- Wang, R.M., Zheng, S.R. and Zheng Y.P. (2011). 3- Matrix materials. *Polym. Matrix Compos. Technol.* Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 101.
- Wenchao, Z., Wenjie, Z., Zhiping, H., Gang, L. and Bin, W. (2019). Tribological performances of epoxy resin composite coatings using hexagonal boron nitride and cubic boron nitride nanoparticles as additives, *Chemical Physics Letters*, 732, 136646.
- Wu, P., Lu, L., He, J., Chen, L., Chao, Y., He, M., Zhu, F., Chu, X., Li, H., Zhu W. (2020). Hexagonal boron nitride: A metal-free catalyst for deep oxidative desulfurization of fuel oils, *Green Energy & Environment*, 5, 166-172.

- Xia, L., Zhang, T., Chai, Z., Hu, X., Jin, F., Wen, G. (2016). Effect of boron doping on fracture behavior of carbon fiber reinforced lithium aluminosilicate glass ceramics matrix composites, *Journal of the European Ceramic Society*, 36, 3513–3522.
- Xu, Z., Chen, Y., Li, W., Li, J., Yu, H., Liu, L., Wu, G., Yang, T., Luo, L. (2018). Preparation of boron nitride nanosheet-coated carbon fibres and their enhanced antioxidant and microwave-absorbing properties, *The Royal Society of Chemistry*, 8, 17944–17949.
- Yadhav, B.R., Govindaraju, H.K., Kiran, M.D. and Suresha, B. (2020). Three-point bending and impact behaviour of carbon/epoxy composites modified with titanium dioxide nanoparticles, *Materials Today Proceeding*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.442>
- York, C. B. (2017). On Bending-Twisting coupled laminates, *Compos. Struct.*, 160, 887900.
- Zakaria, M. R., Akil, H., Omar, M. F., Kudus, M. H.A., Sabri, F. and Abdullah, M. (2020). Enhancement of mechanical and thermal properties of carbon fiber epoxy composite laminates reinforced with carbon nanotubes interlayer using electrospray deposition, *Composites Part C: Open Access*, 3, 100075.
- Zhang, W., Yang, P., Cao, Y., Yu, P., Chen, M., Zhou, X. (2020). Evaluation of fiber surface modification via air plasma on the interfacial behavior of glass fiber reinforced laminated veneer lumber composites, *Construct. Build. Mater.*, 233, 117315.
- Zheng, T., Xi, H., Wang, Z., Zhang, X., Wang, Y., Qiao, Y., Wang, P., Li, Q., Li, Z., Ji, C. and Wang, X. (2020). The curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin composites reinforced by PEEK microparticles, *Polymer Testing*, 91, 106781.
- Zhong, B., Liu, W., Yu, Y., Xia, L., Zhang, J., Chai, Z. and Wen, G. (2017). Enhanced microwave absorption properties of graphite nanoflakes by coating hexagonal boron nitride nanocrystals, *Applied Surface Science*, 420, 858-867.
- Zhou, W., Xiao, P., Li, Y. (2012). Preparation and study on microwave absorbing materials of boron nitride coated pyrolytic carbon particles, *Applied Surface Science*, 258, 8455-8459.
- Zweben, C.H. (2005). Composites: Overview, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 192-208.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAKAL GÜMÜŞ, Fatma







## DİZİN

### A

ASTM · iv, v, xv, 20, 24, 36, 38, 58, 82  
 ASTM D256 · iv, v  
 ASTM D7264 · iv, v

### B

bazalt · iv, xiii, xiv, 1, 2, 3, 7, 10, 11, 18, 22, 23, 24, 26,  
 27, 28, 29, 30, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 54, 55,  
 57, 59, 60, 61, 62, 64, 71, 72, 74, 75, 79, 80, 84, 87,  
 92

### Ç

çekme · iv, xiv, 3, 18, 20, 21, 24, 26, 35, 36, 52, 58, 59,  
 60, 61, 78, 79

### D

darbe · iv, xiii, 2, 3, 11, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 37, 38,  
 65, 66, 87  
 DSC · iv, v, xiii, xv, 3, 26, 31, 32, 40, 41, 42, 77, 87

### E

eğilme · iv, viii, xi, xiii, 11, 19, 20, 22, 23, 36, 37, 63, 64,  
 77, 79, 80  
 elle yatırma · iv, 3, 15, 19, 24, 26, 28, 56, 77  
 epoksi · x, 1, 3, 9, 11, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28,  
 29, 32, 35, 42, 45, 46, 47, 51, 52, 59, 61, 63, 64, 78,  
 79, 84

### F

FTIR · iv, v, xv, 3, 26, 32, 44, 45, 46, 77, 78

### H

hegzagonal nano bor nitrür · iv, 2, 26, 27, 32, 65  
 hibrit · iv, xi, xii, xiv, 3, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29,  
 30, 41, 44, 46, 50, 55, 56, 57, 64, 72, 74, 75, 77, 78,  
 79, 92  
 Hibrit kompozit · iv

### I

İzod · xiii, xiv, 37, 38, 65

### K

karbon · iv, xiii, xiv, 1, 2, 3, 6, 7, 10, 12, 18, 19, 20, 21,  
 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 41, 43, 44, 46, 48, 50,  
 53, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 70, 72, 74, 75,  
 78, 79, 80, 92  
 Kompozit · iv, vii, viii, 1, 5, 12, 18, 20, 26, 28, 32, 34, 45,  
 56, 59, 77, 78

### M

matris · iv, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 19, 23, 26, 32, 52,  
 56, 59, 65, 79  
 Mekanik · iv, 3, 23, 26, 34, 56, 84  
 mikrodalga · iv, 20, 21, 25, 38, 77  
 mikrodalga emilim · iv, 66, 77  
 mikroskop · iv, xiv, 26, 36, 59, 60, 61, 77, 79

### N

Nano · iv, viii, xv, 28, 77, 88, 92

### P

polimer · iv, xiii, 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 16, 18, 23,  
 24, 26, 32, 40, 42

---

**S**

SEM · iv, xiii, xiv, xv, 3, 20, 23, 26, 33, 34, 51, 52, 53, 54,  
55, 85

---

**T**

TGA · iv, v, xv, 3, 20, 26, 32, 42, 43, 44, 78

---

**Ü**

üç noktalı eğilme · iv, 63

---

**V**

vakum torbalama · iv, 3, 15, 26, 28

---

**X**

XRD · iv, v, xv, 3, 26, 33, 46, 47, 48, 49, 50







**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

